

공학석사 학위논문

# 가상 음원배열을 이용한 시역전처리에서의 강인한 집속

Robust focusing in a time-reversal mirror with  
a virtual source array

지도교수 김재수

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

변 기 훈

本 論文을 卞基焄의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장      공학박사   주 재 훈    (인)

위    원      공학박사   서 영 교    (인)

위    원      공학박사   김 재 수    (인)



2015년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

변 기 훈

# 목 차

목 차 .....	i
그림 목차 .....	ii
Abstract .....	iv
1. 서 론 .....	1
1.1 연구의 필요성 및 목적 .....	1
1.2 연구 동향 및 논문 구성 .....	2
2. 음향전파모델 .....	3
2.1 The KRAKEN normal mode program .....	3
3. Time-Reversal Mirror .....	4
3.1 시역전거울(Time-Reversal Mirror, TRM)의 정의 .....	4
3.2 Time-Reversal Mirror에 의한 음장 집속 원리 .....	5
3.3 Time-Reversal Mirror 수치 시뮬레이션 .....	7
3.4 적응 시역전 거울(Adaptive Time-Reversal Mirror, ATRM) .....	12
3.4.1 중첩(superposition)에 의한 다중 집속 .....	13
3.4.2 적응 시역전처리를 이용한 널링(nulling) .....	16
3.4.3 다중제한 방법(Multi Constraint Method, MCM)에 의한 다중 집속 .....	20
4. The concept of Virtual Source Array .....	26
4.1 가상 음원배열(Virtual Source Array, VSA)의 정의 .....	26
4.2 시역전 동기화 및 시지연 빔조향 .....	31
4.3 Virtual Source Array 시뮬레이션 .....	35
5. Robust focusing in Time-Reversal Mirror with Virtual Source Array .....	37
5.1 중첩을 이용한 다중 집속 .....	40
5.2 가상 음원배열을 이용한 적응 시역전처리 .....	42
5.2 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 이용한 다중 집속 방법 .....	47
6. 결 론 .....	51
참고문헌 .....	53

## 그림 목차

Figure 2.1. Waveguide conditions. ....	3
Figure 2.2. Frequency response at 250 Hz. ....	3
Figure 3.1. Received signals at TRM for one-way propagation. ....	4
Figure 3.2. Time-reversed signals at TRM. ....	4
Figure 3.3. Schematic of focusing at PS location for simple two-path propagation. ....	5
Figure 3.4. Schematic of simulation for Time-Reversal mirror. ....	8
Figure 3.5. (a) Source signal, (b) spectrum of source signal. ....	8
Figure 3.6. Frequency response at 250 Hz for one-way propagation. ....	9
Figure 3.7. One-way propagation. ....	10
Figure 3.8. (a) Focusing at PS location, (b) focusing at outbound of PS. ....	11
Figure 3.9. Focusing at PS location at (3500m, 60m). ....	11
Figure 3.10. Schematic of simulation for superposition. ....	12
Figure 3.11. (a) Source signal, (b) Spectrum of source signal at 300Hz. ....	13
Figure 3.12. Frequency response at 300Hz. (a) 20m source depth, (b) 80m source depth. ....	13
Figure 3.13. One-way propagation for superposition. ....	14
Figure 3.14. Focusing at PS locations (6800m,80m) and (7100m,20m) in frequency domain. ....	15
Figure 3.15. (a) Focusing at PS (6800m,80m), (b) focusing at (7100m,20m) in time domain. ....	15
Figure 3.16. Schematic of simulation for Adaptive Time-Reversal Mirror. ....	16
Figure 3.17. (a) Focusing at (6800m,80m), (b) nulling at (7100m,20m) ....	19
Figure 3.18. (a) Nulling at (6800m,80m), (b) focusing at (7100m,20m). ....	19
Figure 3.19. Focusing at (6800m,80m) and nulling at (7100m,20m) with constraint $c=[1 \ 0]$ . ....	22
Figure 3.20. Nulling at (6800m,80m) and focusing at (7100m,20m) with constraint $c=[0 \ 1]$ . ....	23
Figure 3.21. Multiple focusing with distortionless response with constraint $c=[1 \ 1]$ . ....	24
Figure 3.22. Multiple focusing with distortionless response with constraint $c=[1 \ 0.5]$ . ....	25
Figure. 4.1. The concept of virtual point source. ....	27
Figure. 4.2. Simulation for the concept of virtual source array. ....	28

Figure 4.3. Schematic of for virtual source array. ....	29
Figure 4.4. Snapshot for time-reversal mirror using VSA. ....	30
Figure 4.5. Schematic of for virtual source array. ....	31
Figure 4.6. Time-reversal synchronization. ....	33
Figure 4.7. Schematic of simulation for virtual source array. ....	35
Figure 4.8. (a) Source signal, (b) Spectrum of source signal at 500Hz. ....	35
Figure 4.9. Snapshot for time-reversal mirror using VSA. ....	36
Figure 5.1 (a) Conventional VSA, (b) mismatch for ocean variability, (c) robust focusing for mismatch. ....	39
Figure 5.2. Schematic of simulation for superposition. ....	40
Figure 5.3. Probe signal at 500 Hz with hanning window. ....	40
Figure 5.4. Multiple focusing for superposition at VSA1 and VSA2. ....	41
Figure 5.5. Multiple focusing for superposition with long VSA in time domain. ....	42
Figure 5.6. Multiple focusing for ATRM at VSA1 and VSA2. ....	43
Figure 5.7. Multiple focusing for ATRM with long VSA in time domain. ....	44
Figure 5.8. ATRM with MCM for too close constraints. ....	45
Figure 5.9. Multiple focusing for ATRM with long VSA in time domain with close constraints. ....	45
Figure 5.10. Correlation Coefficient between the case of Fig 5.7, Fig 5.9 and waveguide. ....	46
Figure 5.11. Multiple focusing for SVD at VSA1 and VSA2. ....	48
Figure 5.12. Multiple focusing for SVD with long VSA in time domain. ....	49
Figure 5.13. Multiple focusing for SVD at VSA1 and VSA2. ....	50
Figure 5.13. Multiple focusing for SVD with long VSA in time domain. ....	50

# Robust focusing in a time-reversal mirror with a virtual source array

by

Gi Hoon Byun

Department of Ocean Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The effectiveness of Time-Reversal (TR) focusing has been demonstrated in various fields of ocean acoustics. In TR focusing, a probe source is required for a coherent acoustic focus at the original probe source location. Recently, the need of a probe source has been partially relaxed by introduction of the concept of a Virtual Source Array (VSA) [S. C. Walker, Philippe Roux, and W. A. Kuperman, J. Acoust. Soc. Am. 125 (6), 3828-3834 (2009)]. In this paper, Adaptive Time-Reversal Mirror (ATRM) based on multiple constraint method [J. S. Kim, H. C. Song, and W. A. Kuperman, J. Acoust. Soc. Am. 109 (5), 1817-1825 (2001)] and Singular Value Decomposition (SVD) method are applied to a VSA for robust focusing. The numerical simulation results are presented and discussed.

# 1. 서론

## 1.1 연구의 필요성 및 목적

수중에서 음파의 집속은 수중통신(underwater communication) 및 잔향음 제거(reverberation nulling), 능동 이미지 처리(active imaging method), 표적탐지(target localization) 등 다양한 분야에서 적용이 가능하다[1][2][3]. 이러한 음파의 집속을 위한 방법으로 시지연 빔조향(time-delay beam steering) 기법이 균일 매질(homogeneous media) 또는 단순한 환경에서 사용되어진다[4].

하지만 수중에서의 음파 전달은 해저면과 해수면 영향에 의한 다중경로 및 굴절, 산란, 잔향음, 수중소음 등 복잡한 해양환경에 의해 균일 매질에서의 간단한 시지연 빔조향기법 적용의 어려움이 따른다.

시역전처리(Time-Reversal Mirror, TRM)는 이러한 복잡한 해양환경에서도 음파의 에너지를 집속시킬 수 있기 때문에 수중에서의 여러 분야에 널리 사용되어지며 실험적으로 많은 검증이 이루어졌다[5][6].

하지만 시역전처리의 가장 큰 제약조건중 하나는 음파를 집속시키고자 하는 위치에 음원이 항상 존재해야 하는 것이다. 만약 음원을 위치시키기 어려운 곳이나 여러 음원이 필요한 환경에서의 시역전처리 효율성은 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

최근 시역전처리 기반 가상 음원배열(Virtual Source Array, VSA) 개념을 도입하여 일반적인 시역전처리의 제약조건을 부분적으로 해결한 문헌이 발표되었다. 즉, 해양환경에서 전달함수를 알지 못하는 구간 다시 말해, 음원이 존재하지 않는 위치로의 집속을 부분적으로 가능하게 함으로써 일반적인 시역전처리보다 더 효율적인 방법이 제안되었다[7].

본 논문에서는 시역전처리 기반 가상 음원배열 개념을 적용 시역전(Adaptive Time-Reversal Mirror, ATRM) 및 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD) 기법에 적용하여 기존의 가상 음원배열 개념보다 더욱더

강인한 방법으로 음파의 집속이 가능한 알고리즘을 제안하였으며, 수치 시뮬레이션을 통해 본 알고리즘의 분석 및 검증을 수행하였다.

## 1.2 연구 동향 및 논문 구성

시역전처리를 통한 원래 음원 위치에서의 파의 집속현상은 초음파 및 수중 환경에 대해 실험적으로 많은 검증이 이루어 졌다[5][6][8][9]. 이러한 시역전처리를 기반으로 좀 더 효율적으로 음파를 집속시킬 수 있는 적응(adaptive) 방법 또한 제안되었다[10][11][12][13]. 하지만 이러한 적응 방법 또한 일반적인 시역전처리와 동일하게 음원이 존재해야만 하는 제약조건이 따른다.

최근 일반적인 시역전처리를 기반으로 한 가상 음원배열 개념의 도입으로 이러한 제약조건이 부분적으로 해소되었으며 수조실험을 통해 검증이 되었다.

하지만 국내에서는 일반적인 시역전처리에 대한 연구를 수행한 바 있으나, 가상 음원배열 개념 및 다양한 분야로의 적용에 대한 연구는 아직 부족한 실정이며 향후 지속적인 연구가 필요하다.

본 논문은 일반적인 시역전처리 및 적응 시역전처리의 개념을 시뮬레이션을 통해 간단히 설명하고, 가상 음원배열 개념의 적용방안에 대해 목적을 두고 시뮬레이션을 통해 문제점 및 해결방안에 대해 논의하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실제 해양환경을 모의하기 위한 음향전파모델 KRAKEN에 대해 간단히 설명하였고, 3장에서는 일반적인 시역전처리 및 적응 시역전처리의 개념을 시뮬레이션을 통해 설명하였다. 4장 및 5장에서는 가상 음원배열 개념 및 가상 음원배열 개념을 바탕으로 강인한 집속을 위한 여러 방안에 대해 시뮬레이션을 통해 분석 및 검증을 수행 하였다.



## 2. 음향전파모델

### 2.1 The KRAKEN normal mode program

수중에서의 음향전파모델에 관한 프로그램을 구현함에 있어 노말모드(normal mode)를 이용한 방법은 수십 년 동안 사용되어져 왔다. 1948년에 Pekeris에 의해 아주 간단한 해양환경만을 고려한 문헌이 발표되었으며[14], 1970년대에는 발전된 노말모드 기반 모델들이 수중에서의 음향전파 정보를 얻는데 널리 사용되어 졌다[15]. 하지만 기존의 모델들은 음속분포의 변화 및 해양에서의 모드계산에 대해 어려움이 있었기 때문에 더 정확하고, 효율적인 노말모드 기반 음향전파모델의 필요성이 대두 되었다. 본 논문에서는 음향전파특성을 구하기 위해 기존의 음향전파모델에 비해 효율적인 기능과 함께 확장된, 노말모드를 기반으로 한 음향전파모델인 KRAKEN을 사용하였다[16][17].

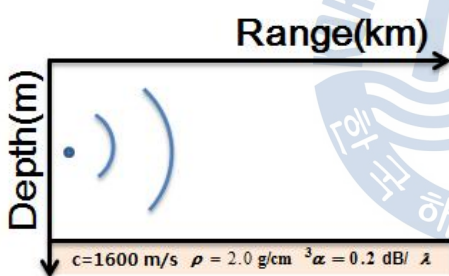


Figure 2.1. Waveguide conditions.

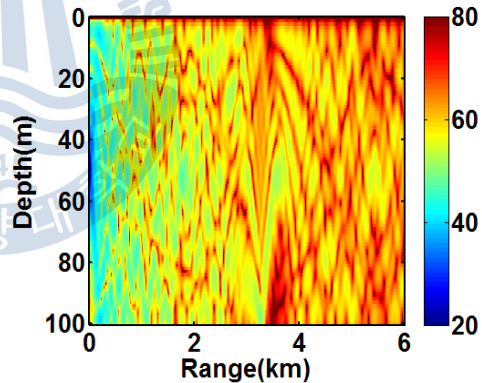


Figure 2.2. Frequency response at 250 Hz.

Fig 2.1은 거리-독립(range-independent) 및 등음속(pekeris waveguide)에 대한 해양 도파관의 환경을 나타내었으며, Fig 2.2는 KRAKEN을 이용하여 250 Hz 음원에 대해 Fig 2.1 환경에서 출력되는 음장에 대한 전달손실(Transmission Loss, TL)을 계산하여 도식화한 것으로 출력된 음장의 정보는 주파수 250 Hz에서의 음파전달에 대한 전달함수로 생각할 수 있다.

### 3. Time-Reversal Mirror

#### 3.1 시역전거울(Time-Reversal Mirror, TRM)의 정의

수중에서 음파를 집속(focusing) 시키기 위한 방법으로 시역전처리(Time-Reversal Process, TRP)가 널리 사용되며 시역전처리시 수신된 신호의 시역전을 위한 트랜스듀서배열을 일반적으로 시역전거울(Time-Reversal Mirror, TRM)이라고 정의한다. 또한, 시간 영역에서 신호의 시역전은 주파수 영역에서 위상공액(phase conjugation)을 의미한다. 음원으로부터 방사된 음파는 다중경로(multi-path)에 의해 왜곡된(distortion) 상태로 TRM 각각의 센서에 수신되게 되며, 이러한 왜곡된 수신신호는 시역전 또는 위상공액을 거쳐 TRM 으로부터 재전파되게 되며, 재전파된 음파들은 가역성원리(reciprocity)에 따라 원래 음원의 위치에 음파가 집속된다[18]. 해양에서의 시역전처리는 해양환경정보를 이용하는 방법인 정합장처리(Matched Field Processing, MFP)와 유사하다. 하지만 정확한 해양환경 정보를 요구하는 정합장처리와 달리, 시역전처리는 해양환경에 대해 자가 적응(self-adaptive)이기 때문에 복잡한 해양환경에서의 음원탐지 및 여러 적용가능 분야에 대해 정합장처리보다 더 효과적이라고 할 수 있다[5].

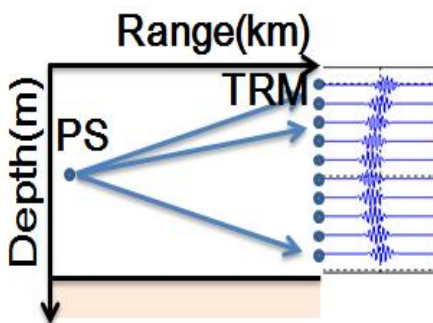


Figure 3.1. Received signals at TRM for one-way propagation.

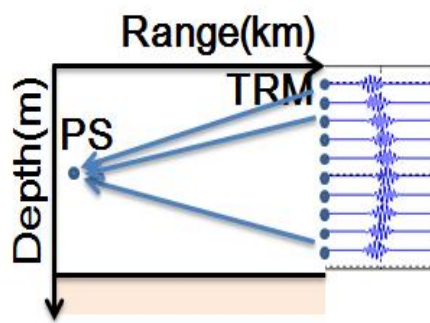


Figure 3.2. Time-reversed signals at TRM.

### 3.2 Time-Reversal Mirror에 의한 음장 집속 원리

본 절에서는 시역전된 수신신호의 재전파를 통한 원래 음원지점으로의 집속현상을 정상모드이론을 이용해 이론적으로 설명하였다.

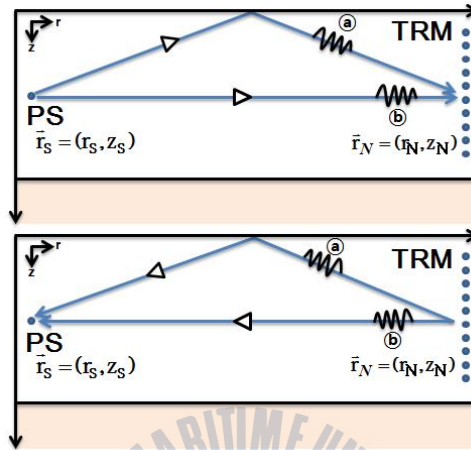


Figure 3.3. Schematic of focusing at PS location for simple two-path propagation.

Fig 3.3은 음파의 집속현상에 대한 간단한 모식도를 나타낸 것이다. Fig 3.3의 위 그림과 같이 두 개의 분리된 전달경로를 통해 ㉠신호가 TRM에 먼저 그 다음 ㉡신호가 수신되게 된다. 서로 다른 두 경로 및 시각에 수신된 두 신호는 시역적 즉, 위상공역을 통해 재전파되게 된다. 이때, Fig 3.3의 아래 그림과 같이 음원으로부터 전달경로가 더 길었던 ㉡신호가 먼저 시역전된 형태로 재전파되고 전달경로가 ㉡신호에 비해 짧았던 ㉠신호가 그다음 재전파되게 되면 두 신호는 원래의 음원의 위치에 동시에 집속되게 된다[19].

여기서, 점음원(point source)으로부터 임의의 위치에서의 음장은 식(1.1)과 같이 Helmholtz 식으로 나타낼 수 있으며, 식(1.1)을 Green 함수에 대해 나타내게 되면 식(1.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$[\nabla^2 + k^2(z)]\psi(r, z) = S_w \frac{\delta(r - r_s)\delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (1.1)$$

$$[\nabla^2 + k^2(z)]G_w(\vec{r}|\vec{r}_s) = -\frac{\delta(r-r_s)\delta(z-z_s)}{2\pi r} \quad (1.2)$$

식(1.2)에서  $G_w(\vec{r}|\vec{r}_s)$ 는 Green 함수를 나타내며 점음원  $\vec{r}_s$ 으로부터 임의의 위치  $\vec{r}$ 에서의 전달함수(transfer function)를 의미한다. 또한 Green 함수는 식(1.3)과 같이 가역성원리가 성립한다.

$$G_w(\vec{r}|\vec{r}_s) = G_w(\vec{r}_s|\vec{r}) \quad (1.3)$$

즉, 시역전처리 과정에서 음원  $\vec{r}_s$ 에서 임의의 위치  $\vec{r}$ 로의 전달함수  $G_w(\vec{r}|\vec{r}_s)$ 는  $G_w(\vec{r}_s|\vec{r})$ 과 같이 전달경로가 임의의 위치  $\vec{r}$ 에서 음원의 위치  $\vec{r}_s$ 으로 바뀌어도 음장은 동일하다는 중요한 의미를 내포한다.

식(1.2)에 대해 원거리(far-field)조건을 가정하고 음장에 대한 방위각대칭 정상모드의 해를 식(1.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_w(\vec{r}|\vec{r}_s) = \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi}} \sum_n \Psi_n(z)\Psi(z_s) \frac{e^{i(k_n r - \pi/4)}}{\sqrt{k_n r}} \quad (1.4)$$

여기서,  $\Psi_n, k_n$ 은 각각 노말모드 고유함수(normal-mode eigenfunction)들과 모드 파수(wavenumber)로써 고유값 문제(eigenvalue problem)로부터 구할 수 있다.

음원의 위치를  $\vec{r}_s$ ,  $N$ 개의 TRM 수신센서를  $\vec{r}_N$ , 그리고  $i$ 번째 수신센서에서의 음장을  $G_w(\vec{r}_i|\vec{r}_s)$ 로 나타내면, 임의의 위치  $\vec{r}$ 에서의 위상공액 음압은 식(1.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N S(w)^* G^*(\vec{r}_i|\vec{r}_s) G(\vec{r}|\vec{r}_i) \quad (1.5)$$

$S(w)$ 는 신호  $s(t)$ 의 Fourier변환을 통한 주파수 영역에서의 신호,  $G_w(\vec{r}|\vec{r}_i)$ 는  $i$ 번째 수신센서로 부터 임의의 위치  $\vec{r}$ 에 대한 전달함수,  $()^*$ 는 위상공액(phase conjugation)을 나타낸다. 식(1.5)의  $G^*(\vec{r}_i|\vec{r}_s)G(\vec{r}|\vec{r}_i)$  부분에서 임의의 위치  $\vec{r}$ 가 음원의 위치  $\vec{r}_s$ 가 될 때 전달함수  $G(\vec{r}|\vec{r}_i)$ 는  $G(\vec{r}_s|\vec{r}_i)$ 가 되며, 가역성원리에 따라  $G(\vec{r}_s|\vec{r}_i) = G(\vec{r}_i|\vec{r}_s)$ 가 되어 점음원 위치에서 집중된 신호는 원래 송신신호의 시역전된 형태를 갖는다[6][18][20].

### 3.3 Time-Reversal Mirror 수치 시뮬레이션

본 절에서는 3.2절에서 설명한 시역전처리를 통한 음파의 집중현상 이론을 바탕으로 시역전처리 수치 시뮬레이션을 시간영역 및 주파수영역에서 수행하였다. 시뮬레이션의 구성은 Fig 3.4와 같다. 음원의 위치는  $\vec{r}_{ps} = (3500m, 60m)$ , TRM 각각의 센서 위치  $\vec{r}_i = (0m, 5m : 3m : 80m)$  거리 0m, 깊이 5m부터 3m간격으로 80m까지 총 26개의 센서로 구성된 배열이며 해양환경은 등음속(pekeris) 및 거리-독립(range-independent) 환경을 고려하였다. 또한 시뮬레이션을 위한 송신신호는 Fig 3.5와 같이 hanning window를 적용한 0.02초 길이의 중심주파수 250 Hz 신호로 모의하였다.

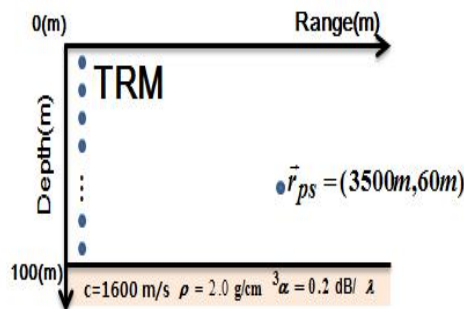


Figure 3.4. Schematic of simulation for Time-Reversal mirror.

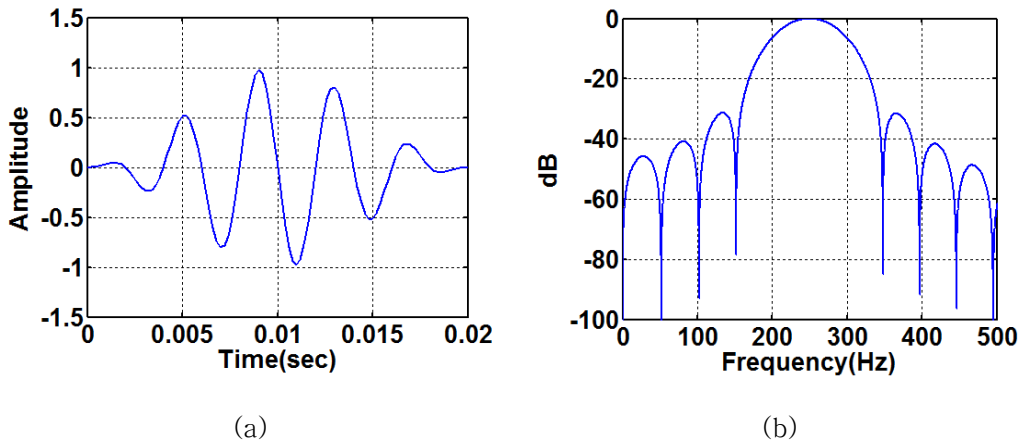


Figure 3.5. (a) Source signal, (b) spectrum of source signal.

Fig 3.4에서 주어진 해양환경에 대한 중심주파수 250 Hz 신호의 전달 특성은 Fig 3.6과 같다. Fig 3.6은 모의된 송신신호에 대한 전달특성을 KRAKEN model을 통해 구한 후 전달손실을 계산해 도식화 한 것이다. KRAKEN model을 통해 구한 전달특성은 주어진 해양환경에서의 전달함수 즉, Green 함수로 정의할 수 있다.

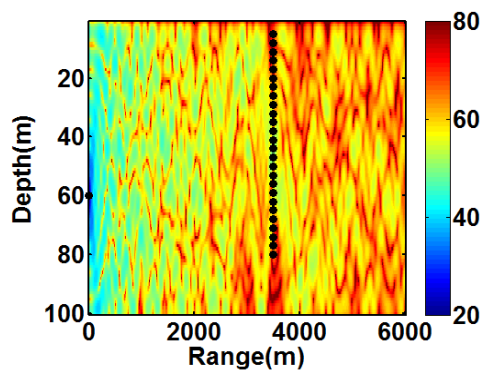


Figure 3.6. Frequency response at 250 Hz for one-way propagation.

음원으로부터 위의 전달경로를 통해 TRM 각각의 센서  $\vec{r}_i$ 에 수신된 신호는 식

(1.6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{r}_i)_{oneway} = S(w)G(\vec{r}_i|\vec{r}_s) \quad (i = 1 \sim N) \quad (1.6)$$

식(1.6)에서  $G(\vec{r}_i|\vec{r}_s)$ 는 주어진 해양환경조건에서 수신되는 신호의 정보를 포함하고 있으며, 수신신호  $p(\vec{r}_i)$ 에 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 수행 후 시간영역의 신호로 나타내면 Fig 3.7과 같다. 수신된 신호는 다중경로에 의한 신호의 형태를 확인할 수 있다.

각각의 TRM 센서에 수신된 신호를 식(1.7)과 같이 주파수 영역에서 위상공액(phase conjugation)을 수행한 후, 시역전된 신호를 전달함수  $G(\vec{r}|\vec{r}_i)$ 를 이용해 재전파하게 된다.

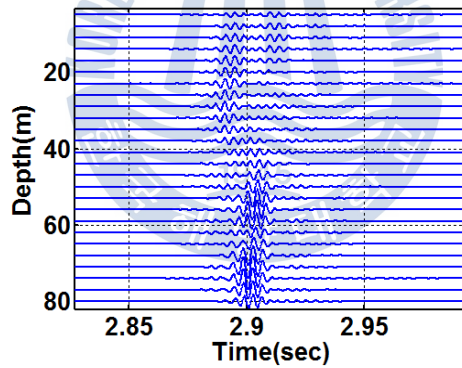


Figure 3.7. One-way propagation.

$$p(\vec{r}_i)^*_{oneway} = S(w)^*G(\vec{r}_i|\vec{r}_s)^* \quad (i = 1 \sim N) \quad (1.7)$$

여기서  $G(\vec{r}|\vec{r}_i)$ 는 TRM으로 부터의 임의의 위치에서 음장을 의미하며, 임의의 위치  $\vec{r}$ 이 음원의 위치  $\vec{r}_s$ 와 같아지면 즉, 전달함수  $G(\vec{r}|\vec{r}_i) = G(\vec{r}_s|\vec{r}_i)$ 가 될 때



식(1.8)은 식(1.9)와 같이 되며 음원의 위치에서 출력이 최대가 되어 Fig 3.8 (a) 및 3.9와 같이 시역전된 형태로 음파가 원래의 음원위치에 집중됨을 시간영역 및 주파수 영역에서 확인할 수 있다.

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N S(w)^* G^*(\vec{r}_i|\vec{r}_s) G(\vec{r}|\vec{r}_i) \quad (1.8)$$

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N S(w)^* G^*(\vec{r}_i|\vec{r}_s) G(\vec{r}_s|\vec{r}_i), \quad (G(\vec{r}_s|\vec{r}_i) = G(\vec{r}_i|\vec{r}_s)) \quad (1.9)$$

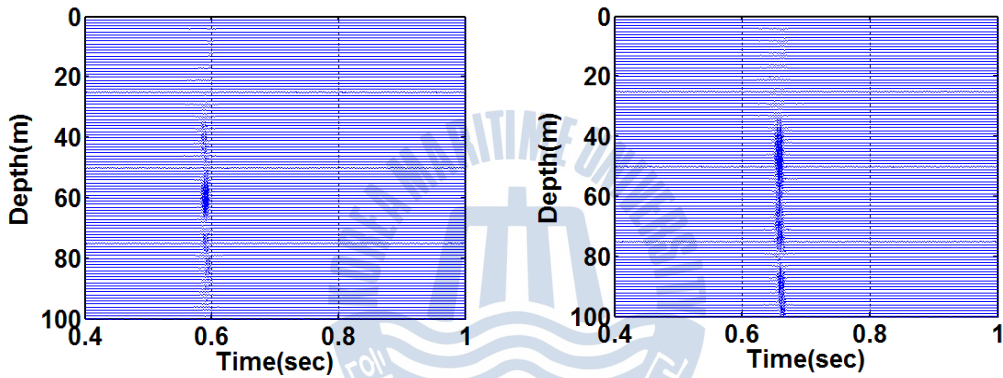


Figure 3.8. (a) Focusing at PS location, (b) focusing at outbound of PS.

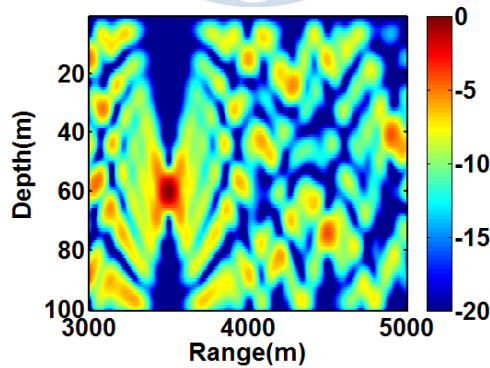


Figure 3.9. Focusing at PS location at (3500m,60m).

만약 원래 음원의 위치보다 거리상으로 100m 가량 더 떨어진 위치에서의 집중현상을



살펴보면 Fig 3.8 (b)와 같이 공간적(spatially)으로 집속현상이 되지 않으며, 시간적(temporally)으로 더욱 분산된 형태를 확인할 수 있다. 일반적으로 음파를 집속하고자 하는 위치가 원래 음원으로부터 멀어질수록 깊이방향의 사이드 로브(side lobe)의 크기가 점차 커짐을 알 수 있다[5].

### 3.4 적응 시역전 거울(Adaptive Time-Reversal Mirror, ATRM)

본 절에서는 음원의 개수가 2개 이상일 때 모든 음원의 위치에 음파를 집속시키는 즉, 다중 집속현상에 대해 논의하였다. Fig 3.10과 같은 해양 도파관 환경에서  $\vec{r}_{ps1} = (6800m, 80m)$ ,  $\vec{r}_{ps2} = (7100m, 20m)$  위치에 두 개의 음원이 존재하며 수신 센서배열  $\vec{r}_{array} = (0m, 5m : 5m : 80m)$ 는 총 16개로 설정 하였다. 또한 등음속(Pakeris waveguide) 및 거리-독립(Range-independent) 환경을 가정하였다

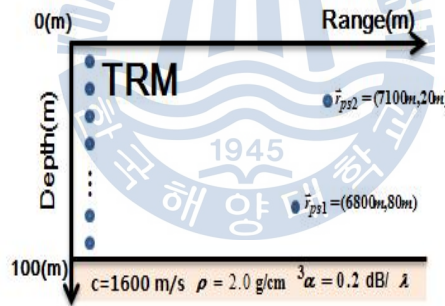


Figure 3.10. Schematic of simulation for superposition.

수치시뮬레이션을 위해 송신신호는 Fig 3.11와 같이 hanning window를 적용한 중심주파수 300Hz의 신호를 모의하였으며 두 음원으로부터 방사된 신호는 Fig 3.12 (a) 및 (b)와 같은 전달특성을 가지고 전파한다. Fig 3.10과 같은 환경에서 두 음원으로부터 방사되어 TRM 각각의 센서에 수신된 신호의 시역전을 통해 음파를 동시에 두 음원의 위치에 동시에 집속시키는 방법으로는 중첩

(superposition)에 의한 다중 집속 및 적응 시역전처리(Adaptive Time-Reversal Mirror, ATRM)을 기반으로 한 다중제한 방법(Multi Constraint Method, MCM)이 있다. 두 방법에 대해서는 다음절에서 자세히 설명하였다.

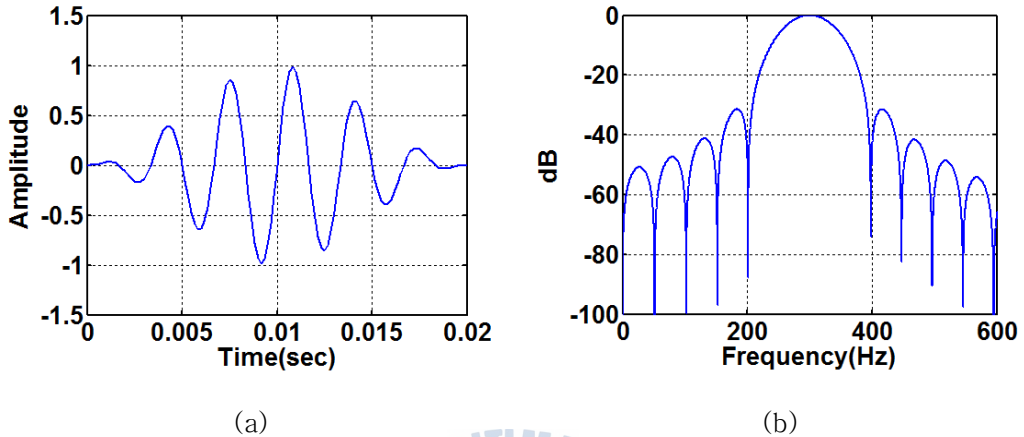


Figure 3.11. (a) Source signal, (b) Spectrum of source signal at 300Hz.

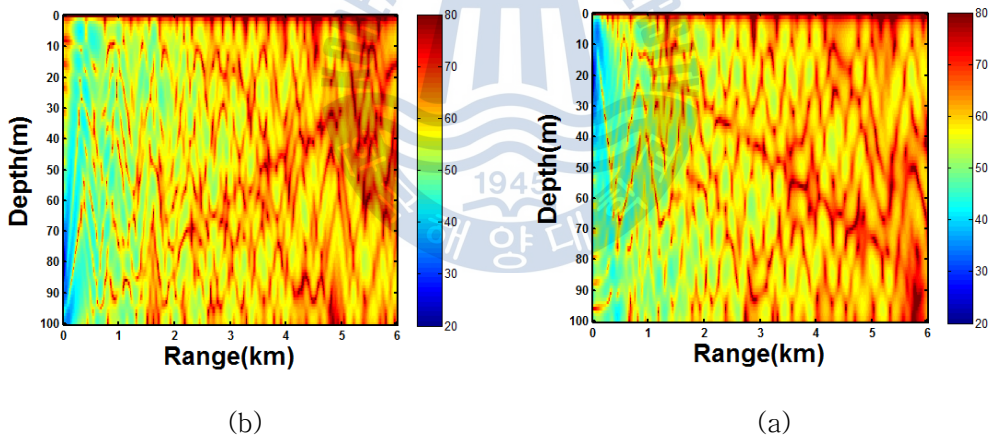


Figure 3.12. Frequency response at 300Hz. (a) 20m source depth, (b) 80m source depth.

### 3.4.1 중첩(superposition)에 의한 다중 집속

두 음원  $\vec{r}_{ps1} = (6800m, 80m)$ ,  $\vec{r}_{ps2} = (7100m, 20m)$ 에서 방사된 음파는 TRM 각각의 센서  $\vec{r}_i$ 에서 서로 합쳐져 새로운 음파를 형성한다. 이때 형성된 음파는 각

각의 음원으로부터 수신된 음파를 산술적으로 더한 값으로 나타나며 이러한 현상을 중첩이라 한다. 두 음원으로부터의 송신신호를  $s(t)$ 로 동일하게 가정하고, 식(2.0)을 통하여 TRM 각각의 센서에 수신되는 신호는 Fig 3.13과 같다.

$$p(\vec{r}_i)_{oneway} = S(w)[G_1(\vec{r}_i|\vec{r}_{ps1}) + G_2(\vec{r}_i|\vec{r}_{ps2})] \quad (i = 1 \sim N) \quad (2.0)$$

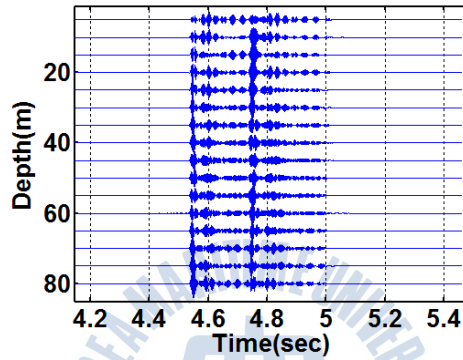


Figure 3.13. One-way propagation for superposition.

시역전된 수신신호를 TRM으로부터 재전파하게 되면 Fig 3.14과 같이 두 음원의 위치에 음파가 집속됨을 확인할 수 있다. 하지만 Fig 3.15와 같이 시간 영역에서의 집속현상을 살펴보면 두 음원의 위치에 음파가 집속은 되나 식(2.1)의 두 음원에 대한 전달함수간의 간섭현상에 의해 집속된 두 음원의 위치에 간섭 신호 또한 발생함을 알 수 있다.

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N S(w)^* [G(\vec{r}_i|\vec{r}_{ps1}) + G(\vec{r}_i|\vec{r}_{ps2})]^* G(\vec{r}|\vec{r}_i) \quad (2.1)$$

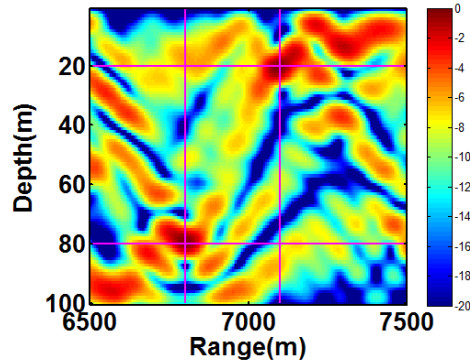


Figure 3.14. Focusing at PS locations (6800m,80m) and (7100m,20m) in frequency domain.

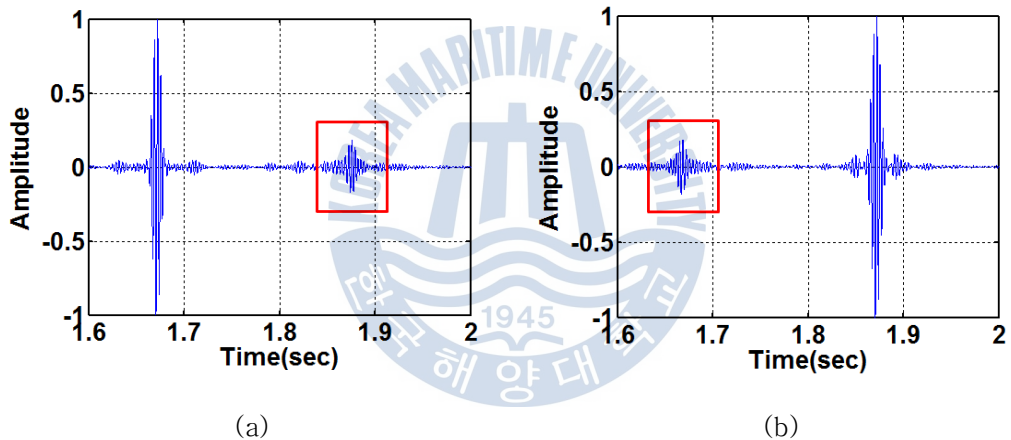


Figure 3.15. (a) Focusing at PS (6800m,80m), (b) focusing at (7100m,20m) in time domain.

이러한 간섭신호는 수중 통신 또는 다른 적용분야에서 성능저하의 원인이 될 수 있으므로 간섭신호의 제거가 필요하다. 다음절에서는 이러한 간섭신호의 제거 즉, 신호의 왜곡현상 없이(distortionless response) 음파의 다중 집속이 가능한 적응 시역전처리(Adaptive Time-Reversal Mirror, ATRM)기법을 설명하고 시뮬레이션 수행하였다.

### 3.4.2 적응 시역전처리를 이용한 널링(nulling)

본 절에서는 음원이 여러 개 존재할 때 중첩에 의한 음파의 집속현상과 달리 원하는 음원의 위치에 음파를 왜곡 없이 집속시키는 동시에 임의의 위치에 널(null)을 형성하기 위한 적응(adaptive)방법에 대해 논의한다.

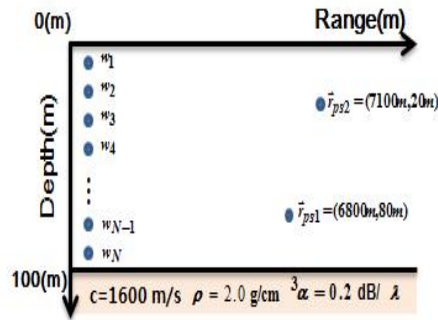


Figure 3.16. Schematic of simulation for Adaptive Time-Reversal Mirror.

3.4.1절에서 설명한 중첩에 의한 다중 집속 방법은 음원들의 위치에 음파의 집속현상은 발생하나 다른 음원의 영향에 의해 집속신호에 간섭현상이 발생함을 확인하였다. 이러한 간섭현상을 제거하기 위해 두 음원으로부터의 수신벡터를  $G(\mathbf{r}_{\text{array}}|\mathbf{r}_{\text{ps}}) = [d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_N]^T$  이라고 했을 때 수신벡터를 Fig 3.16과 같이 신호벡터(signal vector)  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, w_4, \dots, w_N]^T$ 로 수정 하게 되면 적응 시역전처리의 최종 식을 아래 식(2.2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 일반적인 시역전처리에서 음원과 TRM 사이의 순방향 전달함수  $G$ 를 신호벡터  $\mathbf{w}$ 로 계산 후 시역전을 통해 재전파를 수행하게 된다.

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N w_i^* G(\vec{r}|\vec{r}_i) = \mathbf{w}^\dagger G(\vec{r}|\mathbf{r}_{\text{array}}) \quad (2.2)$$

계산된 신호벡터  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, w_4, \dots, w_N]^T$ 는 원하는 음원의 위치에 왜곡현상 없

이 음파를 집속시키는 동시에 다른 방향으로 부터의 파워를 최소화(minimize)하는 역할을 하며 식(2.3)과 같은 구속조건(constraint)로 나타낼 수 있으며 식(2.3)의 구속조건에 의한 문제는 식(2.4)와 같이 목적함수(objective function)의 최적화 문제로 생각할 수 있다.

$$\mathbf{w}^{\dagger} \mathbf{G}(\vec{r}_{ps} | \mathbf{r}_{array}) = 1 \quad (2.3)$$

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^{\dagger} \mathbf{K} \mathbf{w} \text{ subject to } \mathbf{w}^{\dagger} \mathbf{G}(\vec{r}_{ps} | \mathbf{r}_{array}) = 1 \quad (2.4)$$

식(2.4)의 최적화 문제에 대해 신호벡터  $\mathbf{w}$ 는 신호처리 분야에서 널리 알려진 최소분산방법(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)을 이용하여 구할 수 있으며 이는 아래 식 (2.5)과 같다[21][22].

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{K}^{-1} \mathbf{G}(\vec{r}_{ps} | \mathbf{r}_{array})}{\mathbf{G}^{\dagger}(\vec{r}_{ps} | \mathbf{r}_{array}) \mathbf{K}^{-1} \mathbf{G}(\vec{r}_{ps} | \mathbf{r}_{array})} \quad (2.5)$$

식(2.5)에서  $\mathbf{K}$ 는 음원으로부터 측정된 수신벡터의 공분산행렬(Cross Spectral Density Matrix, CSDM)을 의미하며 실제 해양에서의 공분산행렬  $\mathbf{K}$ 는 식(2.6)과 같이  $\mathbf{K}_s$ 와  $\mathbf{K}_n$ 의 합 즉, 신호와 잡음의 공분산행렬 합으로 표현된다. 본 논문에서는 수신벡터의 공분산행렬만 고려하였으며 식(2.7)과 같이 나타낼 수 있다. 실제 해양에서의 신호벡터  $\mathbf{w}$ 는 잡음 및 공분산행렬  $\mathbf{K}$ 의 역행렬의 안전성을 위해 백색잡음 제한(White Noise Constraint, WNC)에 의해 공분산행렬  $\mathbf{K}$ 의 대각행렬에 가중치를 더함으로써 계산된다[12].

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_n \quad (2.6)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{G}(\vec{r}_{ps}|\mathbf{r}_{array})\mathbf{G}^\dagger(\vec{r}_{ps}|\mathbf{r}_{array}) + \mathbf{G}(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array})\mathbf{G}^\dagger(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array}) \quad (2.7)$$

식(2.7)에서  $\vec{r}_n$ 은 널을 형성하고자 하는 음원의 위치를 나타내며 식(2.5)에 식(2.7)의 공분산행렬  $\mathbf{K}$ 를 대입하게 되면 다른 방향으로부터의 신호파워를 최소화시키는 신호벡터  $\mathbf{w}$ 의 성질 식(2.8)에 따라  $\vec{r}_{ps}$  위치에는 음파의 집속이 왜곡 없이,  $\vec{r}_n$  위치에는 널을 형성할 수 있다.

$$\min_{\mathbf{w}} |\mathbf{w}^\dagger \mathbf{G}(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array})|^2 \quad (2.8)$$

Fig 3.17 및 3.18은 3.4.1절과 동일한 환경에서 적응 시역전처리 기법을 이용하여 음파를 원하는 위치에 왜곡 없이 집속 및 널링을 수행한 결과를 나타낸 것이다. Fig 3.17은 두 음원  $\vec{r}_{ps1} = (6800m, 80m)$ ,  $\vec{r}_{ps2} = (7100, 20m)$  중  $\vec{r}_{ps1}$ 에는 집속을  $\vec{r}_{ps2}$ 에는 널링을 수행한 것으로 식(2.7)에서의 공분산행렬  $\mathbf{K}$ 에서 첫 번째 항 즉, 집속 시키고자 하는 위치의 공분산행렬  $\mathbf{G}(\vec{r}_{ps1}|\mathbf{r}_{array})\mathbf{G}^\dagger(\vec{r}_{ps1}|\mathbf{r}_{array})$ 은  $\mathbf{G}(\vec{r}_{ps1}|\mathbf{r}_{array})\mathbf{G}^\dagger(\vec{r}_{ps1}|\mathbf{r}_{array})$ 이 되며 두 번째 항 즉, 널링 시키고자 하는 위치의 공분산행렬  $\mathbf{G}(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array})\mathbf{G}^\dagger(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array})$ 은  $\mathbf{G}(\vec{r}_{ps2}|\mathbf{r}_{array})\mathbf{G}^\dagger(\vec{r}_{ps2}|\mathbf{r}_{array})$ 가 된다. 여기서 두 음원  $\vec{r}_{ps1} = (6800m, 80m)$ ,  $\vec{r}_{ps2} = (7100, 20m)$ 의 수신벡터는 알고 있다고 가정하였으며 위의 공분산행렬  $\mathbf{K}$ 를 아래 식(2.5)에 대입하게 되면 Fig 3.17 (a)와 같이  $\vec{r}_{ps1}$ 에는 왜곡 없이 신호가 집속이 되며,  $\vec{r}_{ps2}$ 에는 (b)와 같이 널링이 됨을 확인할 수 있다.

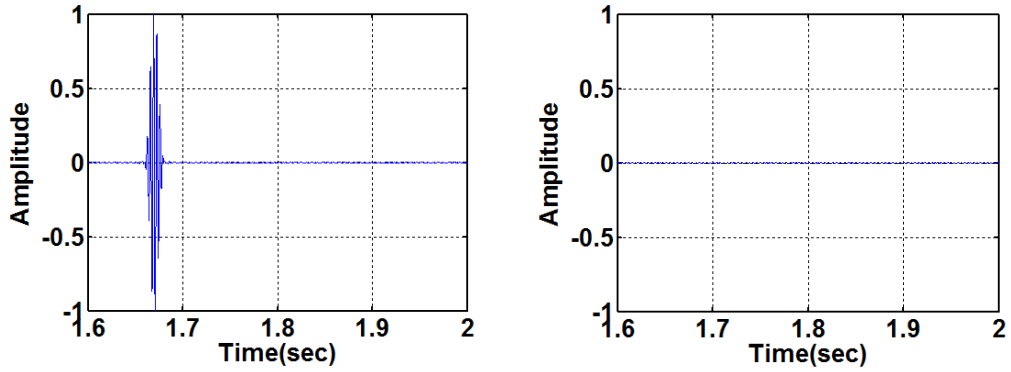


Figure 3.17. (a) Focusing at (6800m, 80m), (b) nulling at (7100m, 20m)

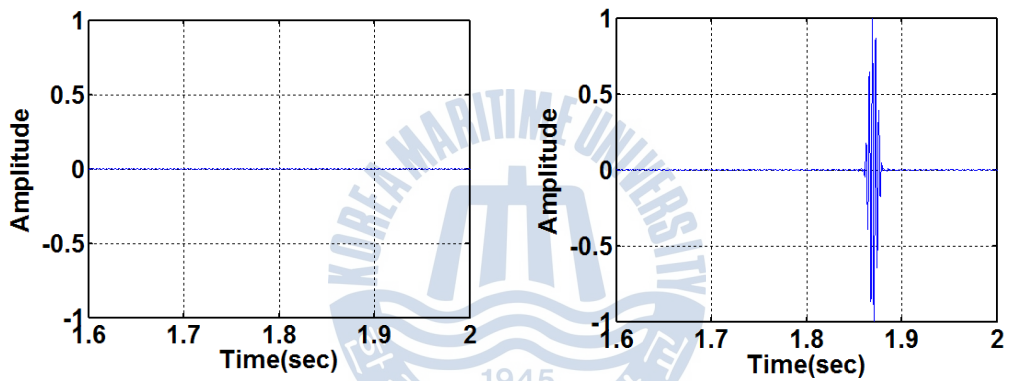


Figure 3.18. (a) Nulling at (6800m, 80m), (b) focusing at (7100m, 20m).

만약 널을 형성하고자 하는 위치가 두 곳 이상이라면 식(2.7) 공분산행렬  $G(\vec{r}_{ps}|\mathbf{r}_{array})G^\dagger(\vec{r}_{ps}|\mathbf{r}_{array}) + G(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array})G^\dagger(\vec{r}_n|\mathbf{r}_{array})$ 에 나머지 널 위치의 공분산행렬을 추가하면 된다.

본 절에서는 적응 시역전처리 기법을 통해 두 음원 중 원하는 위치에 음파의 집속을 그리고 나머지 위치에 널을 형성할 수 있음을 수치 시뮬레이션을 통해 확인 하였다.



### 3.4.3 다중제한 방법(Multi Constraint Method, MCM)에 의한 다중 집속

3.4.2절에서는 적응 시역전처리 기법을 통해 왜곡 없이 원하는 음원의 위치에 음파의 집속이 가능함을 보였다. 하지만 적응 시역전처리 기법을 통해 음파의 집속을 수행할 시 여러 곳에 널의 형성은 가능하지만 음파의 집속은 단 한 곳의 위치만 가능하다. 이러한 제약 조건을 해결하기 위해 본 절에서는 다중제한 방법(Multi Constraint Method, MCM) 기법을 통해 왜곡 없이 음파의 다중 집속이 가능함을 시뮬레이션을 통해 검증 하였다[13].

공간상에 존재하는 여러 음원들의 위치에 왜곡 없이 동시에 신호를 집속시키기 위해서는 식(2.3)의 단일 위치 구속조건에서 확장된 식(2.9)와 같은 다중 구속조건이 필요하다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^\dagger \mathbf{G}(\vec{r}_{ps1} | \mathbf{r}_{\text{array}}) &= c_1 \\ \mathbf{w}^\dagger \mathbf{G}(\vec{r}_{ps2} | \mathbf{r}_{\text{array}}) &= c_2 \\ &\vdots \\ \mathbf{w}^\dagger \mathbf{G}(\vec{r}_{psM} | \mathbf{r}_{\text{array}}) &= c_M \end{aligned} \quad (2.9)$$

식(2.9)을 행렬식으로 표현하면, 식(2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}^\dagger \mathbf{w} = \mathbf{c} \quad (2.10)$$

여기서,  $\mathbf{w}$ 는 신호벡터( $N \times 1$ ),  $\mathbf{M}$ 은  $M$ 개의 음원으로부터  $N$ 개의 TRM 센서에 수신되는 수신벡터( $N \times M$ )로 구성된 행렬을 나타내며  $\mathbf{c}$ 는 구속치 응답벡터로써 ( $M \times 1$ )으로 구성된 행렬이다. 식(2.10)의 다중 구속조건에 의한 문제는 식(2.11)와 같이 목적함수의 최적화 문제로 귀결된다.

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^\dagger \mathbf{K} \mathbf{w} \text{ subject to } \mathbf{M}^\dagger \mathbf{w} = \mathbf{c} \quad (2.11)$$

식(2.12)의 범함수(functional)를 최소로 하는 해를 구하기 위해 신호벡터  $\mathbf{w}$ 에 대한 도함수(derivative)를 구하고, Lagrange 승수벡터  $\lambda$ 에 대해 식을 풀면, 식(2.13)과 같이 왜곡 없이 다중 집속이 가능한 신호벡터  $\mathbf{w}$ 를 구할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{w}^\dagger \mathbf{K} \mathbf{w} - \lambda (\mathbf{M}^H \mathbf{w} - \mathbf{c}) \quad (2.12)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M} [\mathbf{M}^\dagger \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \mathbf{c} \quad (2.13)$$

식(2.13)의 구속치 응답벡터  $\mathbf{c}$ 는 신호의 집속 및 널링을 위한 벡터이다 즉,  $\mathbf{c}$ 가 1이면 비 왜곡 응답특성을 0이면 널링을 의미하며 또한  $\mathbf{c}$ 의 값에 따라 집속되는 위치에서의 서로간의 음장 세기를 조절할 수 있다.

3.4.1절의 중첩에 의한 다중 집속 방법과 결과 비교 및 검증을 위해 3.4.1절과 동일한 환경 조건에서 비 왜곡 다중 집속 기법에 대해 수치시뮬레이션을 수행 하였다. Fig 3.19는 두 음원에 대한 구속치 응답벡터  $\mathbf{c}$ 를  $\vec{r}_{ps_1} = 1$ ,  $\vec{r}_{ps_2} = 0$  즉,  $\vec{r}_{ps_1}$  위치에는 비 왜곡 집속을  $\vec{r}_{ps_2}$  위치에는 널링을 수행한 결과이며 Fig 3.20은 Fig 3.19와 반대로  $\vec{r}_{ps_1}$  에는 널링을  $\vec{r}_{ps_2}$  에는 비 왜곡 집속을 수행한 결과이다. Fig 3.21는 구속치 응답벡터  $\mathbf{c}$ 의 값을 [1 1] 즉, 비 왜곡 다중 집속을 수행하였고 Fig 3.22는  $\mathbf{c}$ 의 값을 [1 0.5]로 하여 서로간의 집속 음장세기의 상관성을 비교해 보았다.

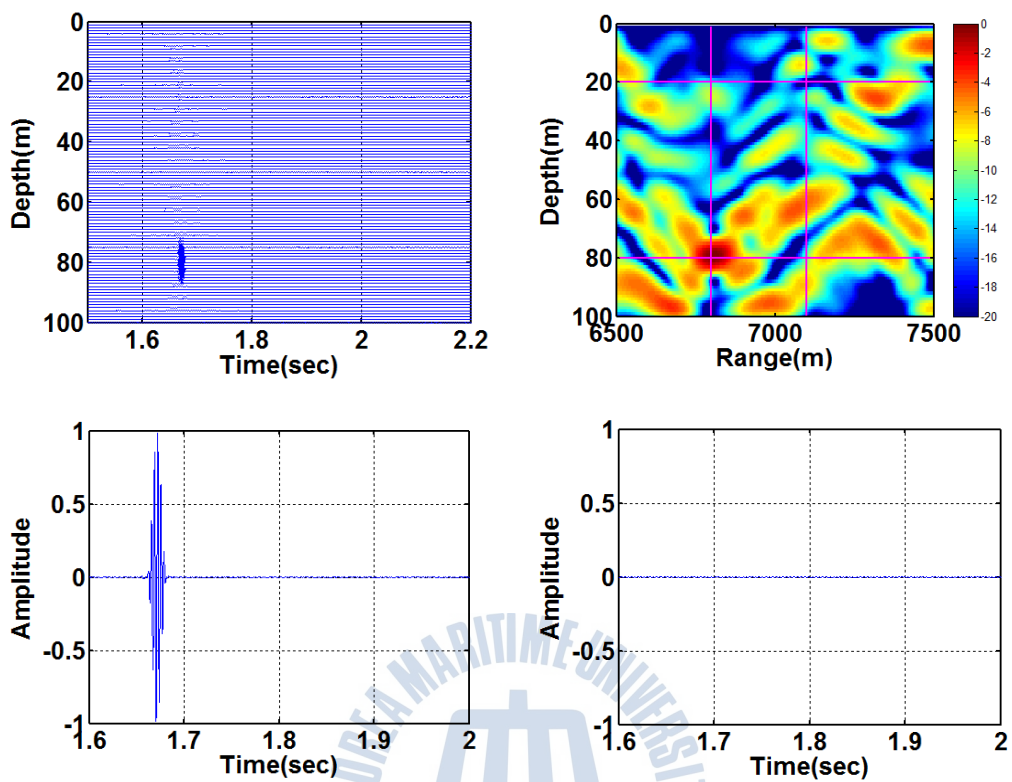


Figure 3.19. Focusing at (6800m,80m) and nulling at (7100m,20m) with constraint  $c=[1 \ 0]$ .

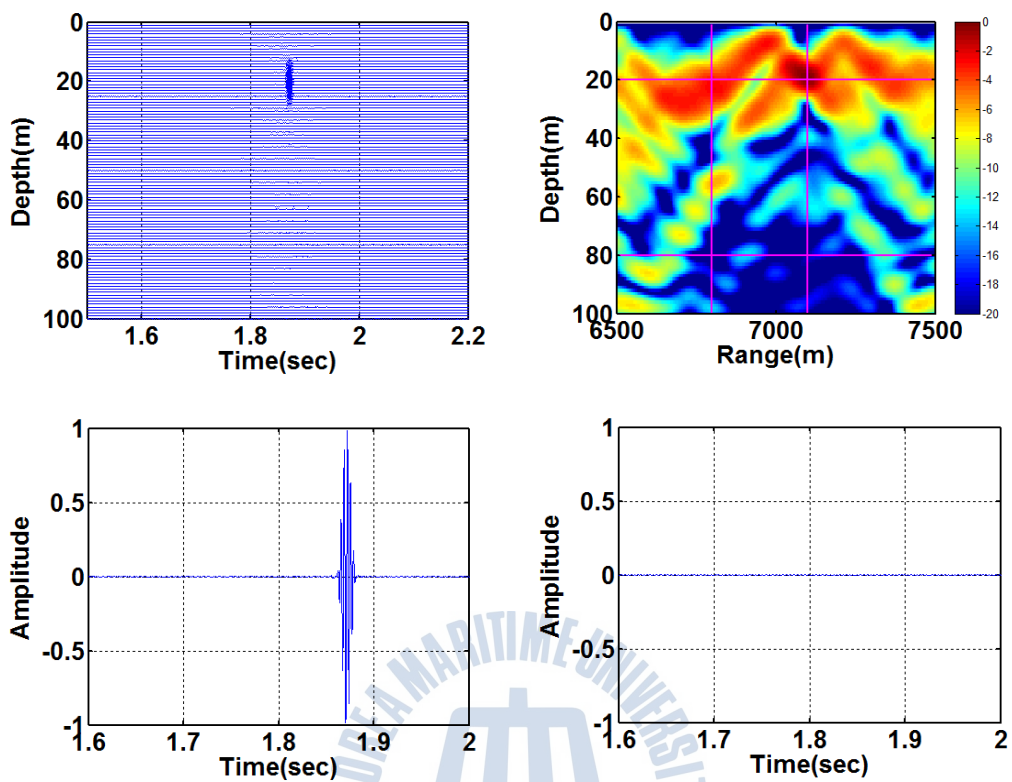


Figure 3.20. Nulling at (6800m,80m) and focusing at (7100m,20m) with constraint  $c=[0 \ 1]$ .

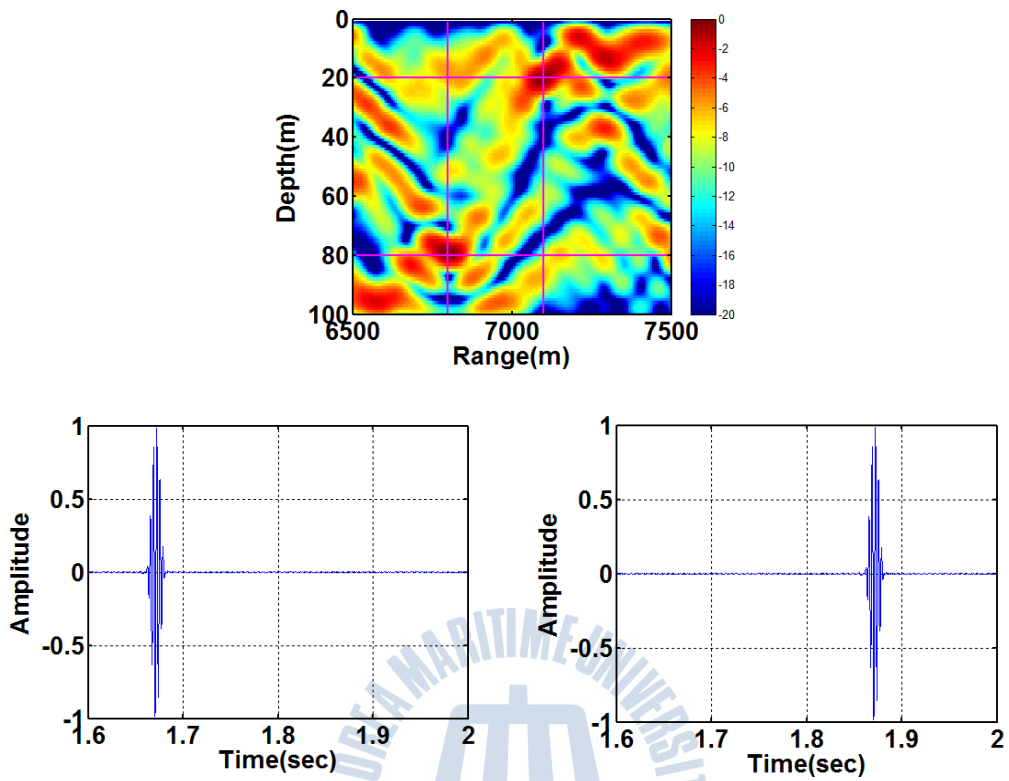


Figure 3.21. Multiple focusing with distortionless response with constraint  $c=[1 \ 1]$ .

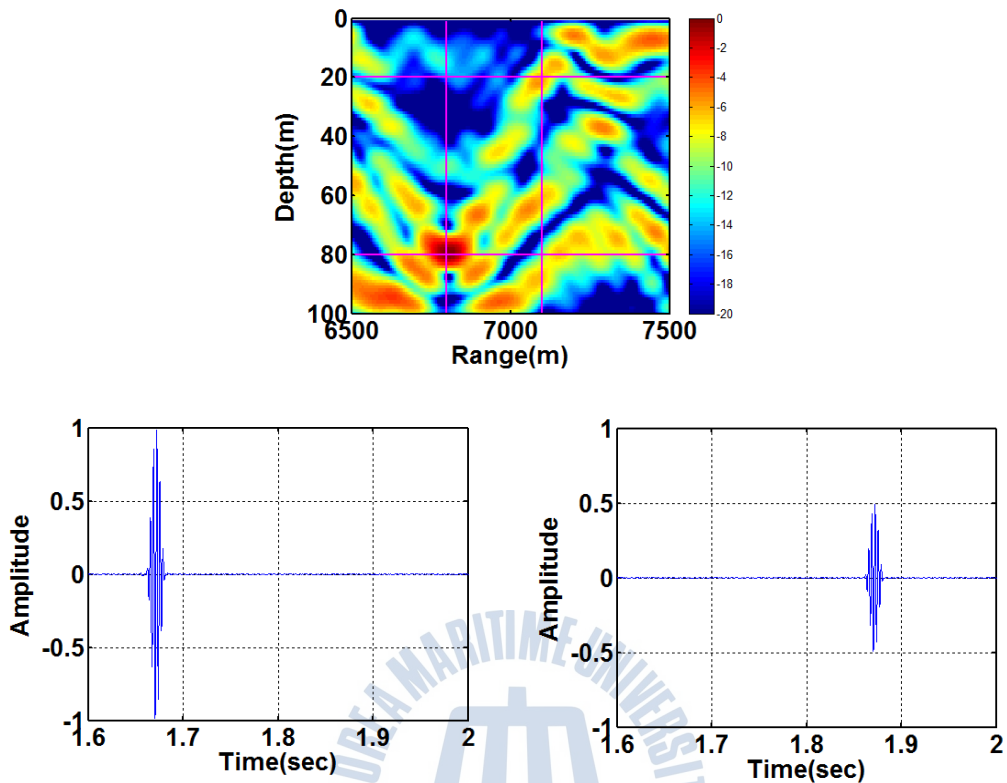


Figure. 3.22. Multiple focusing with distortionless response with constraint  $c=[1 \ 0.5]$ .

수치 시뮬레이션을 통해 적응 시역전처리를 기반으로 한 다중 집속 기법 즉, 구속치 응답벡터  $c$ 의 값에 따른 비 왜곡 다중 집속현상을 Fig. 3.19 및 3.20, 3.21, 3.22를 통해 살펴보았다. 또한 중첩 및 다중 집속 기법의 결과를 비교함으로써 적응 시역전처리 기반 다중 집속 기법이 비 왜곡 응답특성을 가지며 효율적인 다중 집속이 가능함을 확인할 수 있다.

## 4. The concept of Virtual Source Array

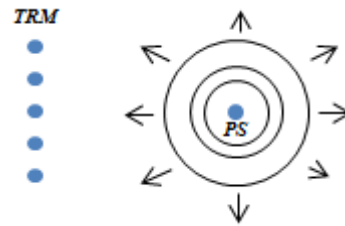
3절에서는 시역전처리의 개념 및 원리에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였으며 중첩에 의한 다중 집속, 비 왜곡 단일집속 그리고 비 왜곡 다중 집속 등 여러 가지 적응방법에 대해 살펴보았다. 수중에서 이러한 일반적인 시역전처리 및 적응 시역전처리를 수행할 때, TRM에서 수신된 신호는 음원과 TRM사이의 전달함수의 정보를 포함하고 있기 때문에 해양 그 자체가 정합 필터(matched filter)로 간주될 수 있다. 즉, 자가-적응(self-adaptive) 성질에 의해 전달함수에 대한 사전 모델링이 필요 없으며 이는 시역전처리의 큰 효율성으로 작용한다. 하지만 이러한 시역전처리는 음파를 집속시키고자 하는 위치에 항상 음원이 존재해야하는 제약조건이 따른다. 만약 해저면에 묻혀있는 표적의 탐지(detection) 또는 위치추적(localization)을 목적으로 할 때 음원을 해저면 표적근처에 위치시킬 수 없기 때문에 시역전처리에 큰 제약조건이 따른다. 최근 이러한 시역전처리 시 발생하는 제약조건을 부분적으로 해결이 가능한 즉, 음원이 존재하지 않는 곳에도 일반적인 시역전처리의 시·공간적 집속 해상도와 유사한 성능을 가지는 음파의 집속 방법이 제안되었다[7].

다음 4.1절에서 시뮬레이션을 통해 이러한 개념을 이해하고 여러 가지 적용 가능 분야에 대해 논의하였다.

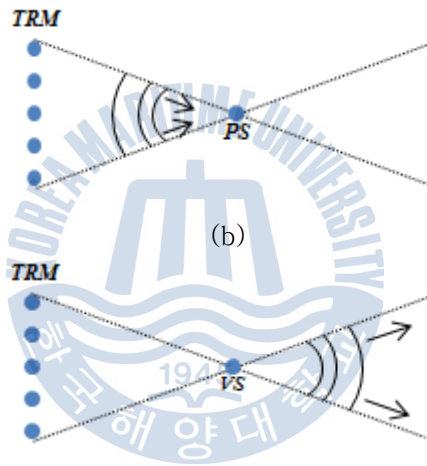
### 4.1 가상 음원배열(Virtual Source Array, VSA)의 정의

Fig 4.1은 자유환경(free space)에서 일반적인 시역전처리의 모식도 및 가상 점음원(virtual point source)의 개념을 나타낸 것이다[7]. Fig 4.1 (a)와 같이 음파가 원래 음원의 위치에서 모든 방향(omni direction)으로 즉, 모든 필드(field)에 대해 방사된다고 가정 할 때, 음원에서 방사된 필드를 TRM에서 샘플 및 시역전 후 재전파하게 되면 (b)와 같이 원래 음원의 위치로 수렴(spherically converging)하게 된다. 이 후 집속된 TRM과 음원사이의 필드(TRM-PS transfer

function)는 (c)와 같이 음원으로부터 다시 발산(spherically diverging)하는 형태로 나아간다. 집속 후 음원으로부터 나아가는(outbound) 방향의 필드는 원래의 필드와 비교 하였을 때 시역전된 상태 즉, 시역전 필드로 특정 원뿔형(forward cone)안에서 나아간다는 점 이외에는 원래의 필드와 유사한 형태를 가진다.



(a)



(c)

Figure. 4.1. The concept of virtual point source.

이런 의미에서 시역전처리를 통한 음파의 집속 후 원래의 음원은 가상 점음원으로 간주될 수 있으며 가상의 점음원으로 부터 나아가는 필드를 가상의 점음원 필드(virtual point source field)라 정의할 수 있다.

Fig 4.2는 자유환경에서 Fig. 4.1의 (b)와 (c)를 시뮬레이션 한 결과이며 등음속  $1500m/s$  및  $\vec{r}_{ps} = (1700m, 50m)$  위치의 음원을 가정한다. (a)부터 (g) 순서로 스냅샷(snapshot)에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내며 Fig 4.1에서 설명하였던 형태로 필드가 수렴 후 유사한 형태로 다시 발산하는 것을 확인할 수 있다.



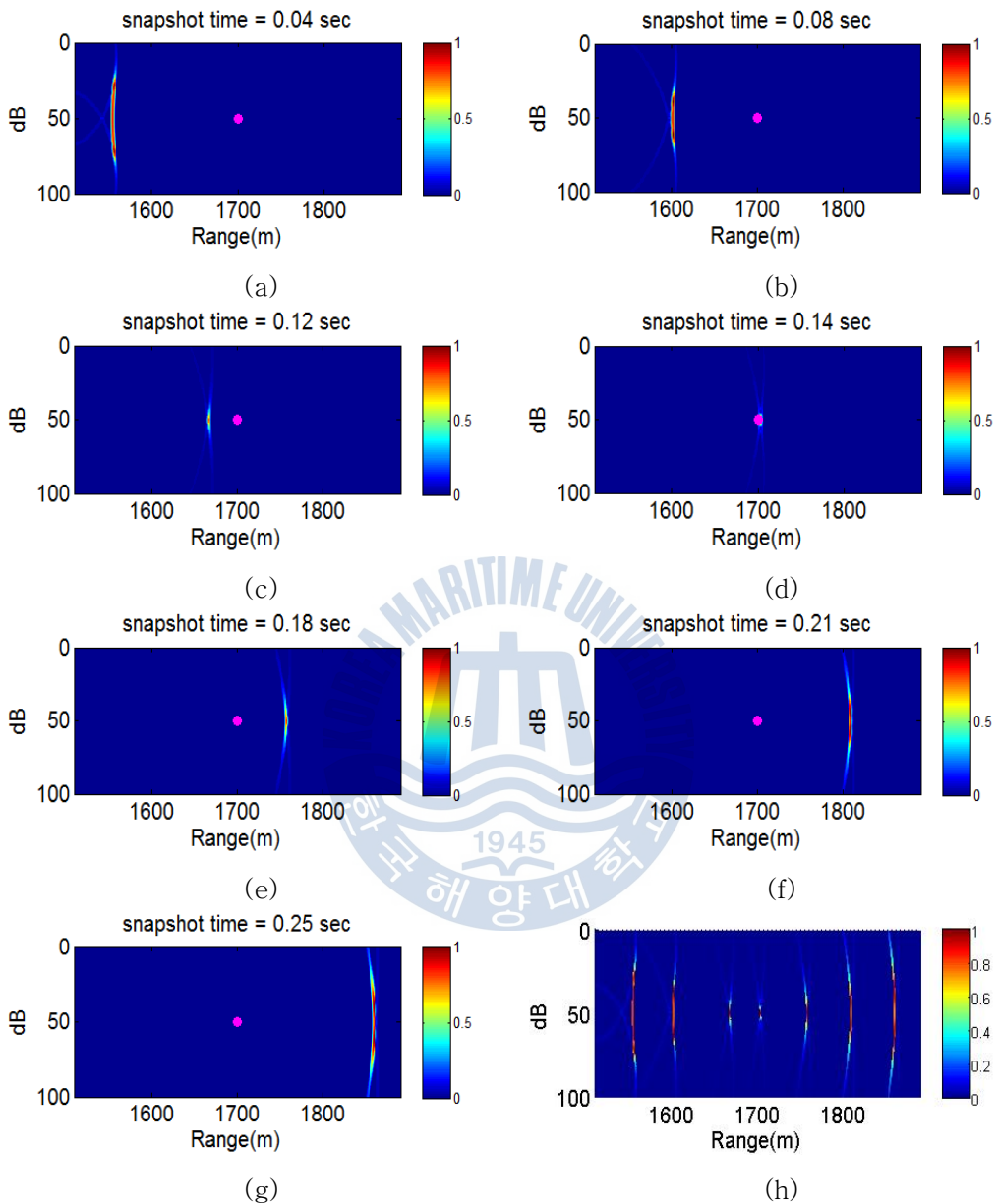


Figure. 4.2. Simulation for the concept of virtual source array.

이러한 가상 점음원을 Fig 4.3과 같이 선배열의 형태로 확장 후, 이러한 실질적인 선배열을 가상 음원배열(virtual source array, VSA)이라 정의할 수 있다.

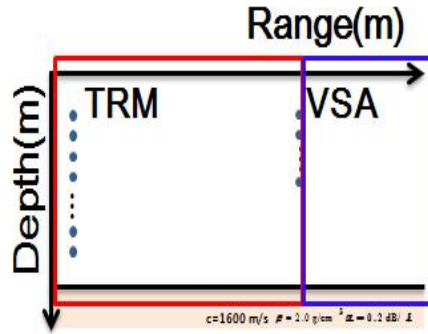
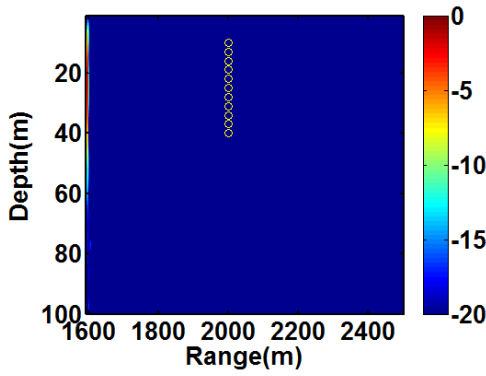
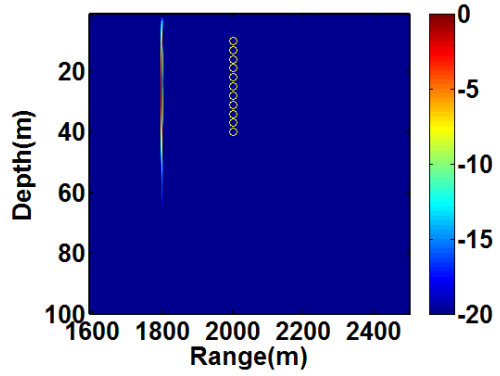


Figure 4.3. Schematic of for virtual source array.

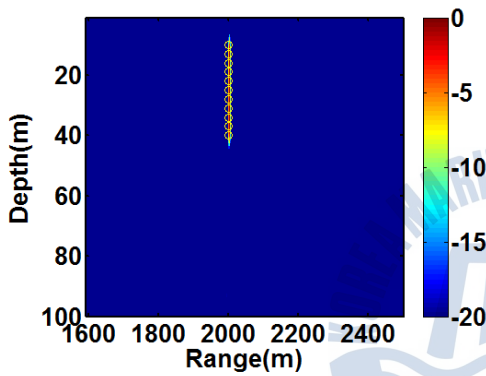
Fig. 4.3은 가상 음원배열 개념에 대한 모식도이다. 가상 음원배열 즉, 선배열로부터 나아가는 방향인 파란색 사각형 범위는 전달함수를 알지 못한다고 가정한 부분이다. 즉, 수중에서의 전달함수에 대한 정보를 알지 못하기 때문에 파란색 구간의 임의의 위치에 음파를 집속시키는 것은 불가능하다. 하지만 Fig 4.2와 같이 시역전처리를 통한 TRM-PS 전달함수는 원래의 음원 위치로의 집속 이후, 원래의 필드와 유사한 형태로 다시 나아가기 때문에, TRM-VSA사이의 전달함수를 확장하여 VSA로부터 나아가는 방향 즉, 파란색 구간인 전달함수를 알지 못하는 구간으로의 확장 또한 가능함을 알 수 있다. 하지만, 시역전처리를 통한 TRM-VSA 전달함수를 파란색 구간 까지 확장한다 하여도 음파가 Fig 4.4와 같이 발산하는 형태로 VSA로부터 나아가는 것을 알 수 있다. 즉, 시역전처리를 통한 TRM-VSA 전달함수를 확장하여 VSA로부터 나아가는 방향으로 음파를 전파시킬 수는 있지만 집속은 여전히 불가능함을 Fig 4.4를 통해 확인할 수 있다. Fig 4.4는 Fig 4.3과 같은 등음속 및 거리-독립 환경의 해양도파관에서 주파수 500 Hz의 hanning widonw 송신신호를 사용하였다.



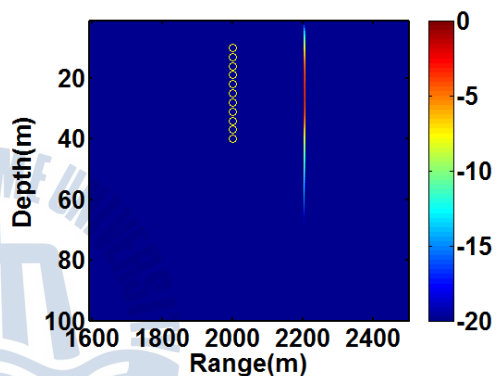
(a)



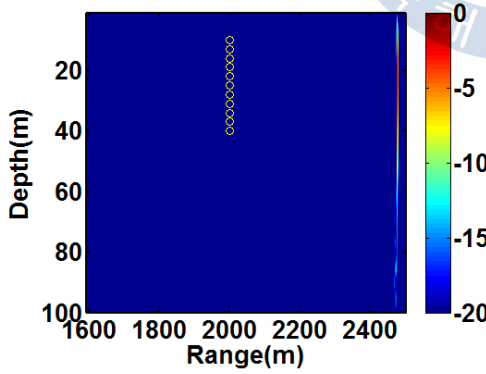
(b)



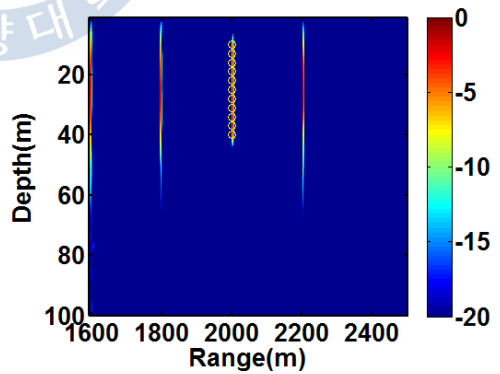
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 4.4. Snapshot for time-reversal mirror using VSA.

만약 Fig 4,5와 같이 가상음원(Virtual Probe Source, VPS) 즉, 전달함수를 알지 못하는 구간의 임의의 위치에 시역전처리를 통한 TRM-VSA 전달함수를 확장하여 음파를 집속시키기 위해서는 시역전 동기화(time-reversal synchronization) 및 시지연 빔조향(time-delay beamsteering) 기법이 적용되어야 하며 자세한 내용은 다음 절에서 설명하였다.

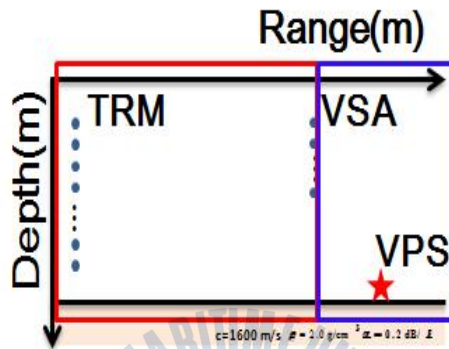
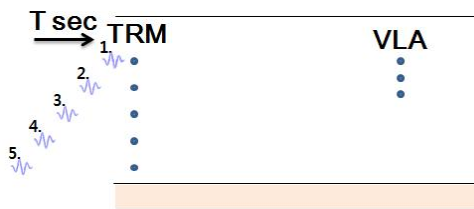


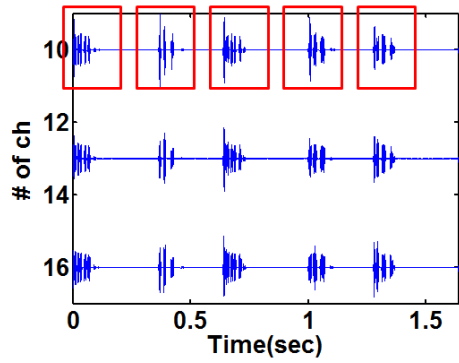
Figure 4.5. Schematic of for virtual source array.

#### 4.2 시역전 동기화 및 시지연 빔조향

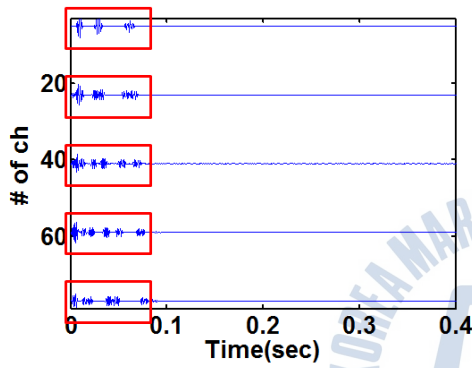
본 절에서는 가상 음원배열 개념을 바탕으로 음파를 집속시키기 위해 필요한 개념인 시역전 동기화 및 시지연 빔조향에 대해 설명하였다. Fig 4.6은 시역전 동기화 처리를 나타낸 것으로 간단한 시뮬레이션을 위해 5개의 TRM 센서 및 3개의 VSA 센서를 가정하였다. (a)에서 보듯이 TRM 각각의 센서로부터 송신 신호가 일정한 시간  $T$ 초 간격으로 라운드 로빈(round robin fashion) 방법으로 전송된다.



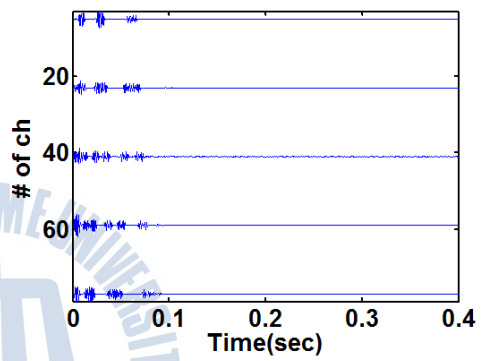
(a)



(b)



(c)



(d)

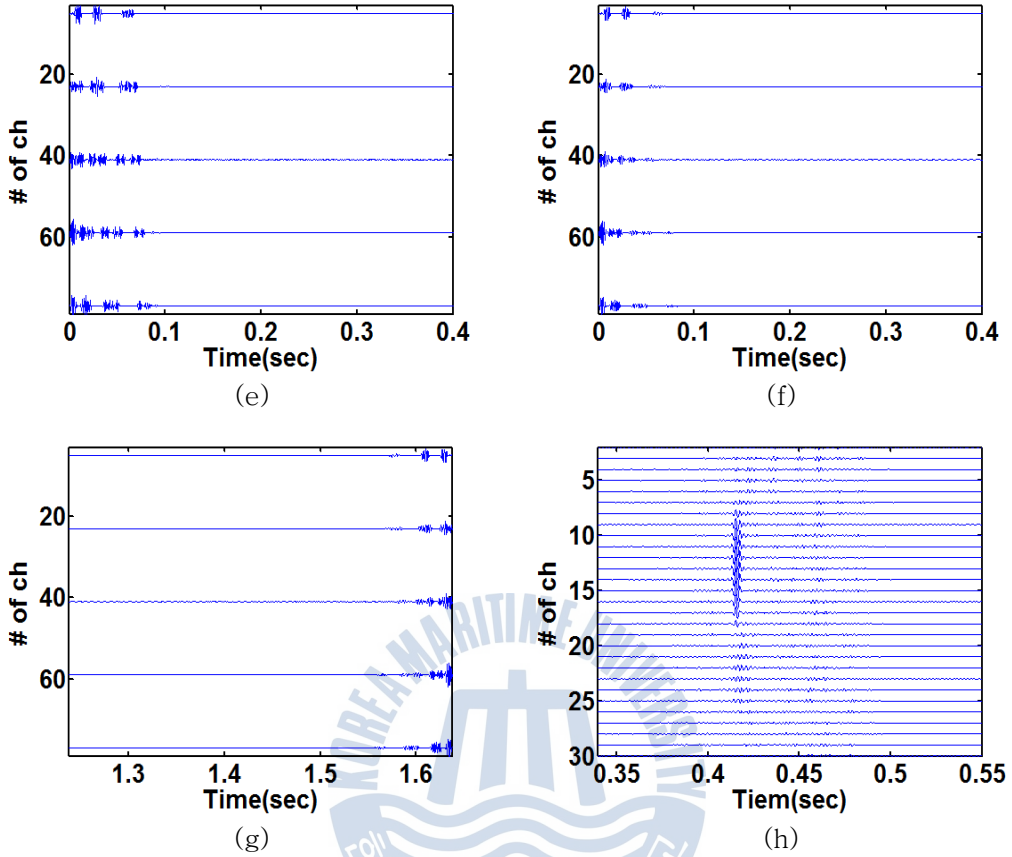


Figure 4.6. Time-reversal synchronization.

$T$ 초 간격으로 전송된 신호는 해양도파관을 거쳐 (b)와 같이 가상 음원배열 각각의 센서로 수신되게 된다. 이때 송신신호  $s(t)$ 의 푸리에 변환을  $S(w)$ 라고 했을 때 가상 음원배열 각각의 센서로 수신되는 신호는 식(4.1)과 같다.

$$p(\vec{r}_i) = S(w) \sum_{t=1}^N G(\vec{r}_i | \vec{r}_t) \exp^{jwT(t-1)}, \quad i = 1 \sim M \quad (4.1)$$

$G(\vec{r}_i | \vec{r}_t)$ 는 TRM 각각의 센서  $\vec{r}_t$  에서 가상 음원배열 센서  $\vec{r}_i$  로의 전달함수를 의미하며 가상 음원배열 각각의 센서에 수신된 신호는  $T$ 초 간격으로 분리되어

(c),(d),(e)와 같이 TRM으로 피드백 된다. 이와 같이 TRM으로 피드백된 동기화 신호들을 (f)와 같이 합한 신호는 가역성원리에 따라 식(4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{r}_t) = S(w)G(\vec{r}_t|\mathbf{r}_{VLA}) \quad (4.2)$$

$$p_{VLA} = \sum_{t=1}^N S(w)^* G^*(\vec{r}_t|\mathbf{r}_{VLA}) G(\vec{r}|\vec{r}_t) \quad (4.3)$$

TRM으로 피드백된 동기화 신호들은 식(4.3)을 통해 (h)와 같이 가상 음원배열로 집속됨을 확인 할 수 있다.

만약 Fig 4.5에서 가상 음원배열과 가상음원사이를 균일매질이라고 가정하게 되면 가상 음원배열과 가상음원사이의 전달함수는 식(4.4)와 같이 시지연 빔조향을 통해 간단히 구할 수 있다.

$$t_n = \sqrt{(r_x - r_f)^2 + (z_x - z_f)^2} / c \quad (4.4)$$

식(4.4)는 시지연 빔조향에 대한 식으로  $(r_x, r_z)$ 는 가상 음원배열 센서 각각의 위치를 나타내며 가상음원 즉, 집속을 원하는 지점의 위치는  $(r_f, z_f)$ 가 된다. 식(4.4)를 통해 구한 가상 음원배열과 가상음원사이의 시간 차이를 시역전 동기화를 통해 구한 TRM-VSA사이의 전달함수에 적용한다면 가상 음원배열로부터 나아가는 방향 즉, 해양도파관에서의 전달함수를 알지 못하는 구간까지 TRM-VSA 전달함수를 확장 및 조향하는 개념으로 원하는 지점으로의 음파집속이 가능하다. 또한 천해(shallow water)구간에서의 음속변화는 아주 미세하므로 가상 음원배열로부터 근거리 음장(near-field)범위 안에서는 시지연 빔조향에 대한 오차가 적어 효율적으로 적용이 가능하다[4][7].

### 4.3 Virtual Source Array 시뮬레이션

본 절에서는 동기화 시역전처리 및 시지연 빔조향 방법을 조합한 가상 음원배열 개념을 도입하여 전달함수를 알지 못하는 구간의 원하는 지점에 음파의 집속현상을 시뮬레이션을 통해 수행하고 기존의 시역전처리 방법과 결과를 비교 하였다. Fig 4.7은 가상 음원배열 시뮬레이션을 위한 해양도파관 환경이며 TRM( $5m:3m:90m$ ) 총 29개, VSA( $10m:3m:40m$ ) 총 11개 센서를 가정하였으며 집속시키고자 하는 위치 VPS는( $2275m, 98m$ )로 설정하였다. 중심주파수 500Hz의 송신신호 및 등음속, 거리-독립 환경을 고려하였다.

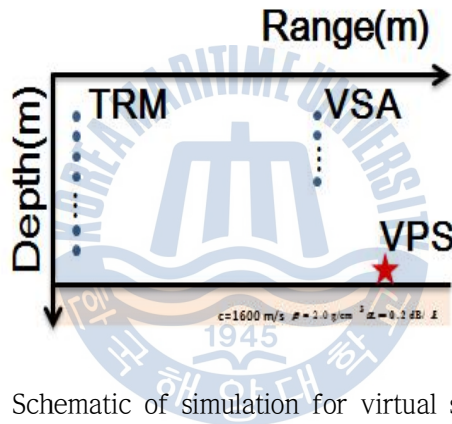


Figure 4.7. Schematic of simulation for virtual source array.

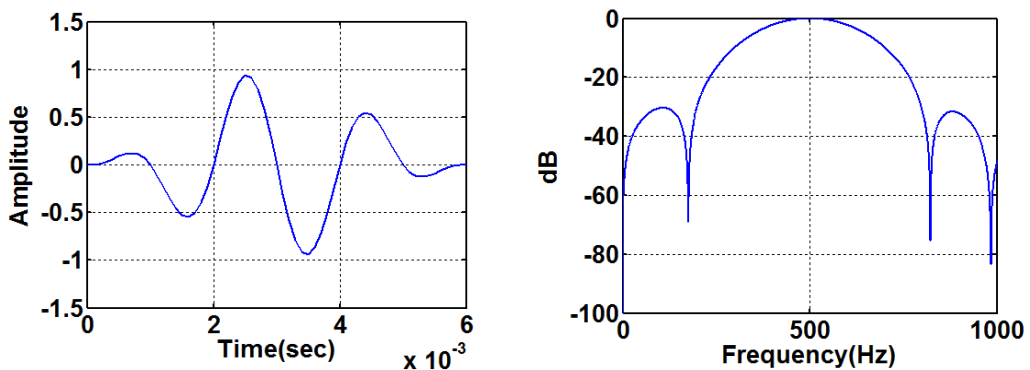


Figure 4.8. (a) Source signal, (b) Spectrum of source signal at 500Hz.



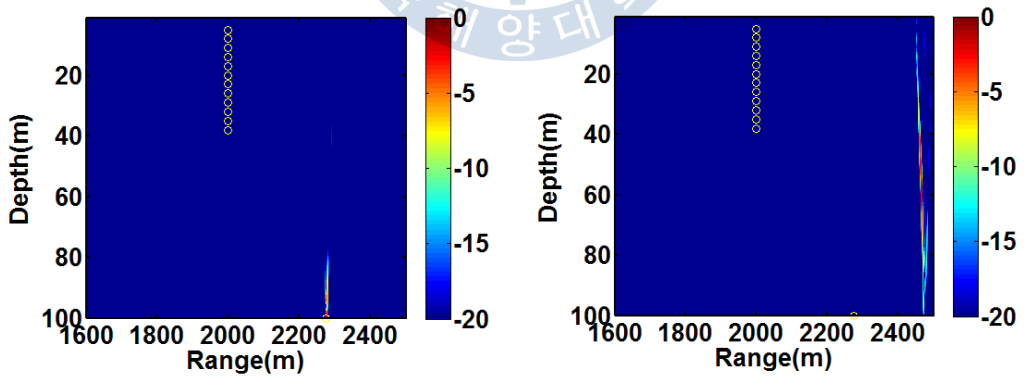
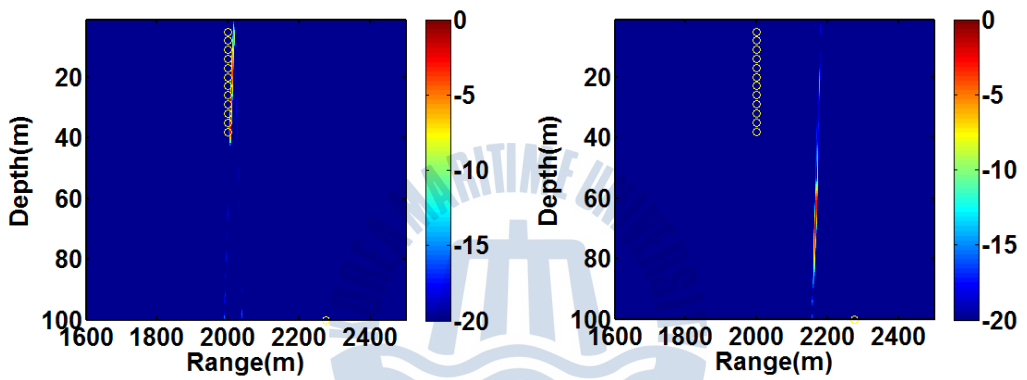
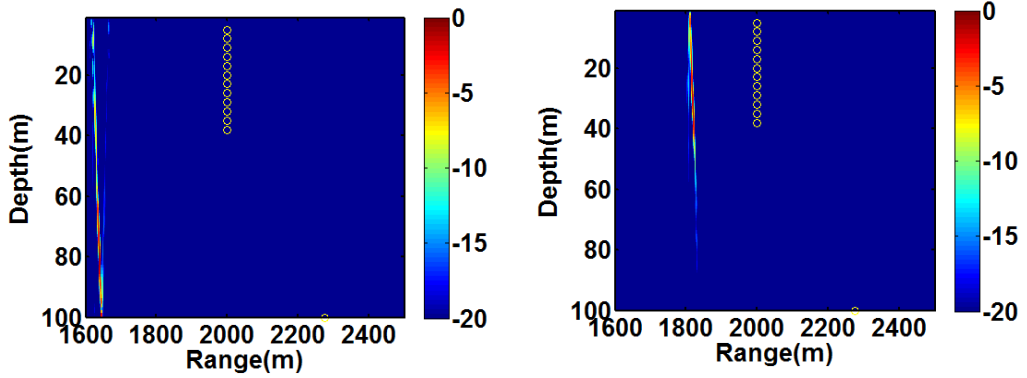


Figure 4.9. Snapshot for time-reversal mirror using VSA.

Fig 4.4의 시지연 빔조향 기법을 적용하지 않은 시역전처리 결과와 달리 Fig 4.9는 가상 음원배열과 가상음원사이의 환경을 균일매질이라고 가정 후, 시지연 빔조향 기법을 통해 가상 음원배열과 가상음원사이의 시간차를 구하고 TRM-VSA 전달함수에 적용한 결과, 가상음원 위치에서의 음파의 집속이 이루어짐을 Fig 4.9를 통해 확인할 수 있다.

본 절을 통해 가상 음원배의 개념에 대해 살펴보았으며 일반적인 시역전처리와의 결과 비교를 통해 음원이 존재해야만 하는 일반적인 시역전처리와 달리 음원이 존재하지 않는 구간 즉, 해양환경에서 전달함수를 알지 못하는 구간에도 음파의 집속이 가능함을 확인 하였다. 다음절에서는 이러한 가상 음원배열 개념에 적용 시역전처리 및 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD) 개념을 적용하여 실제 해양에서 일어날 수 있는 부정합(mismatch) 또는 다중 집속에 강인한(robust) 방법을 살펴보도록 한다.

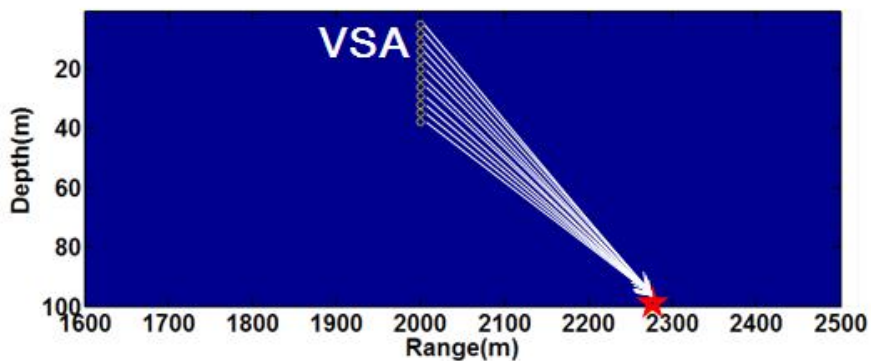
## 5. Robust focusing in a Time-Reversal Mirror with a Virtual Source Array

실제 해양에서 일반적인 시역전처리를 통한 음파의 집속성능은 복잡한 해양환경의 변동성 또는 음원의 주파수에 따라 그 성능이 저하됨을 알 수 있다. 특히, 내부파(internal wave) 영향에 의한 순방향 전파(one-way propagation) 및 역방향 전파(back-propagation) 사이의 음속분포의 변화(sound-speed fluctuation)는 음파의 집속위치 변화(focal shift)에 영향을 미치며 이러한 위치 변화에 의해 집속성능이 저하됨을 또한 알 수 있다[10].

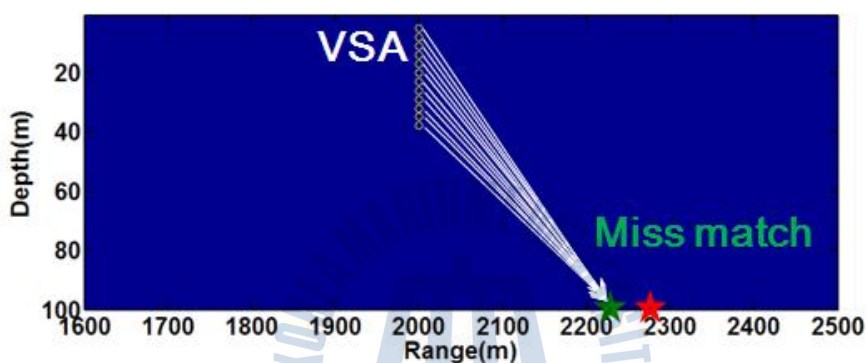
본 장에서는 신호의 왜곡현상 없이 다중 집속이 가능한 적응 시역전처리 및 특이값 분해 개념을 가상 음원배열 개념에 적용하여 전달함수를 알지 못하는 위치에도 실제 해양에서 발생할 수 있는 집속 부정합(mismatch) 및 다중 집속에 대해 강인한 집속성능을 유지할 수 있는 방법을 제안하였다.

Fig 5.1 (a)는 일반적인 가상 음원배열에 대한 집속을 나타낸 것이다. 이상적인 환경에서 해양환경 변동성이 없을 때 (a)와 같이 정확한 위치에 음파의 집속이 가능할 것이다. 하지만 가상 음원배열을 실제해양에서 수행할 시 (b)와 같이 음파의 집속위치가 변동(shift)하는 현상 즉, 집속 위치 부정합 현상이 발생할 것이다. 이러한 부정합 현상에 대해 강인한 집속을 위해 (c)와 같이 다중 집속을 수행하여 집속크기(focal spot)를 넓혀 부정합에 의해 발생하는 집속위치 변동에도 강인한 방법으로 집속할 수 있는 방법을 시뮬레이션을 통해 다음절에서 설명 하였다.

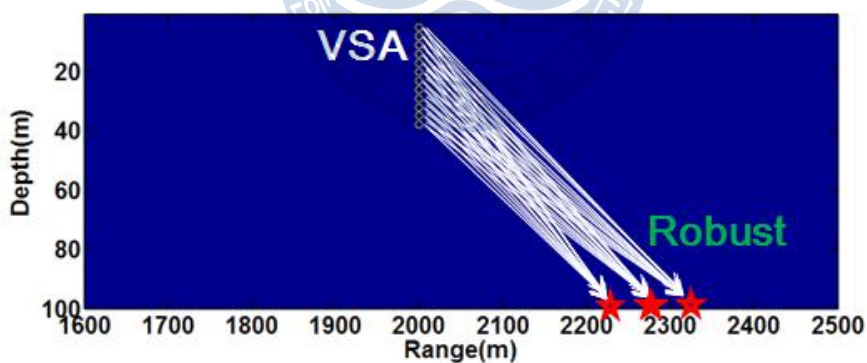




(a)



(b)



(c)

Figure 5.1. (a) Conventional VSA, (b) mismatch for ocean variability (c) robust focusing for mismatch.

## 5.1 중첩을 이용한 다중 집속

다중 집속을 위한 방법으로는 일반적인 시역전처리와 동일하게 중첩 및 적응 시역전에 의한 방법이 있다. 본 절에서는 가상 음원배열 개념에 중첩원리를 적용하여 다중 집속현상에 대해 살펴본 후 문제점에 대해 살펴보도록 한다.

Fig 5.2와 같이 등음속 및 거리-독립 해양 도파관 환경을 가정 하며, 송신 신호는 Fig 5.3과 같은 hanning window를 적용한 중심주파수 500 Hz 신호를 모의 하였다.

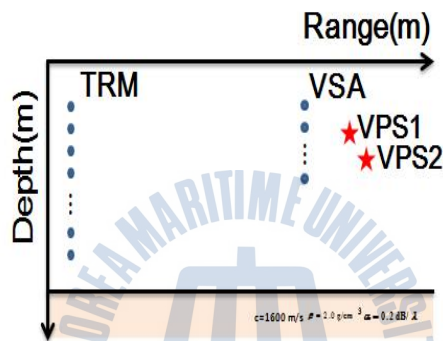


Figure 5.2. Schematic of simulation for superposition.

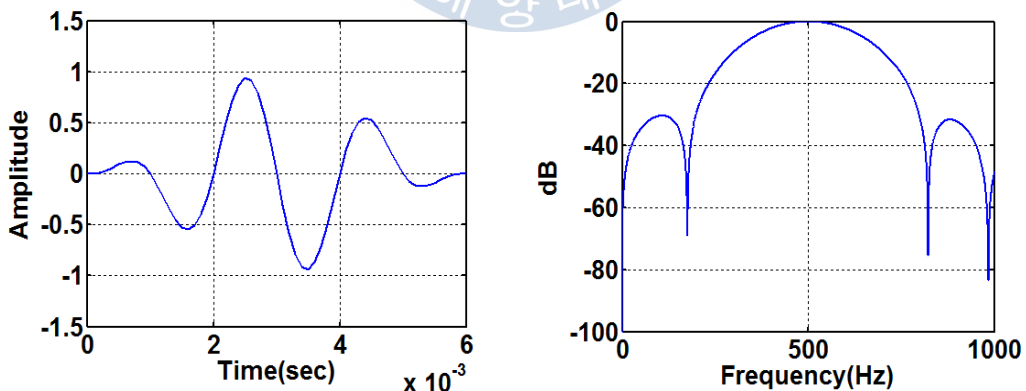


Figure 5.3. Probe signal at 500 Hz with hanning window.

TRM의 개수는 (5m : 3m : 89m)까지  $\lambda$ 간격으로 총 29개이며 VSA의 개수는

( $5m:3m:59m$ )까지  $\lambda$ 간격으로 총 19개로 설정하였다. 두 개의 가상음원의 위치는 각각  $VPS1=(2275m,25m)$ ,  $VPS2=(2300m,35m)$ 로 설정 하였으며 실제로는 존재하지 않지만 집속을 하고자하는 임의의 선택된 위치이다. Fig 5.2와 같은 해양도파관 환경에서 가상 음원배열 개념을 기반으로 한 중첩에 의한 다중 집속 성능을 Fig 5.3과 같이 주파수영역에서 우선 살펴보도록 한다.

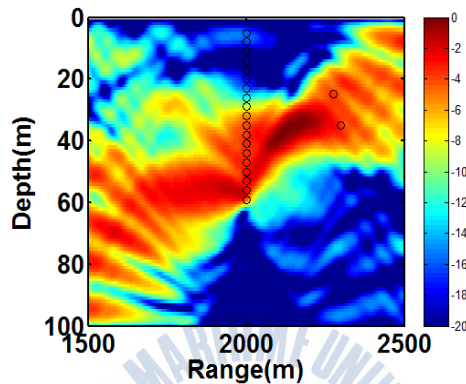
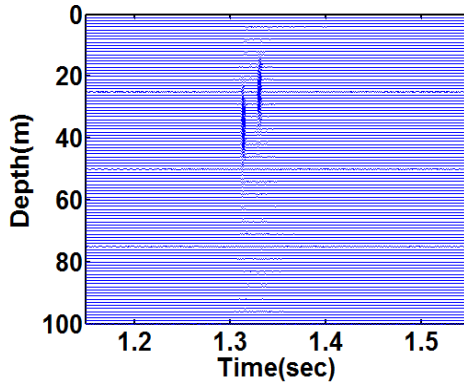
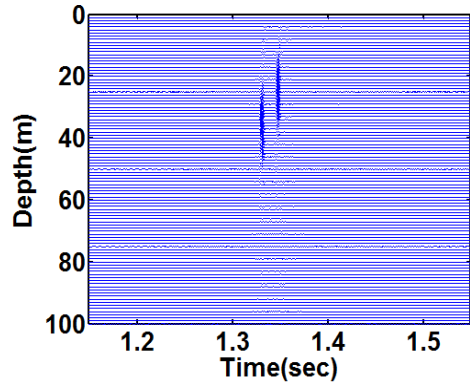


Figure 5.4. Multiple focusing for superposition at VSA1 and VSA2.

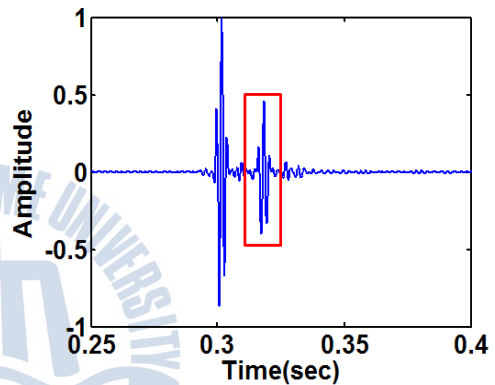
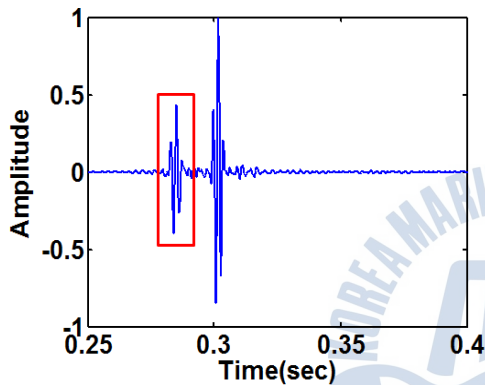
Fig 5.4에서 거리 2000m의 검은 원들은 VSA의 위치이며 거리 2275m 및 3000m 지점은 VPS1 와 VPS2를 의미한다. 위 그림에서 보듯이 음파가 두 가상음원 VPS1과 VPS2를 향해 전파되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 주파수 영역에서는 중첩에 의한 다중 집속현상을 대략적으로 살펴볼 수는 있지만 정확한 음파의 집속형태를 파악하기는 힘들다. 그래서 Fig 5.5과 같이 시간영역에서 음파의 집속현상을 살펴보도록 한다. Fig 5.5 (a)와 (b)는 VPS1 및 VPS2의 각각의 거리 방향 에서의 깊이변화에 따른 집속현상을 시간영역에서 나타낸 노멀라이즈된 신호이다. (c)와 (d)는 VSA1 및 VSA2의 각각의 위치에서의 집속신호를 나타내며 빨간색 사각형안의 신호처럼 각각의 음원들 간의 영향 의한 간섭신호가 발생함을 쉽게 확인 할 수 있다.



(a). Depth stack for VPS1.



(b). Depth stack for VPS2.



(c). Focused signal at (2275m, 25m). (d). Focused signal at (2300m, 35m).

Figure 5.5. Multiple focusing for superposition with long VSA in time domain.

이러한 간섭신호 제거를 위해 3.4.3절에서 설명한 적응 시역전처리 기법을 적용하여 간섭신호제거를 목적으로 시뮬레이션을 수행하였으며 다음 절에서 자세히 설명 하였다.

## 5.2 가상 음원배열을 이용한 적응 시역전처리

본 절에서는 5.2 절에서 살펴본 중첩에 의한 다중 집속현상 시 발생하는 간섭신호의 제거를 위해 적응 시역전 개념을 가상음원배열 개념에 적용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 해양도파관 환경 및 송신신호는 5.1 절과 동일하게 설정하였으며 주파수 영역에서의 결과는 Fig 5.6과 같다.

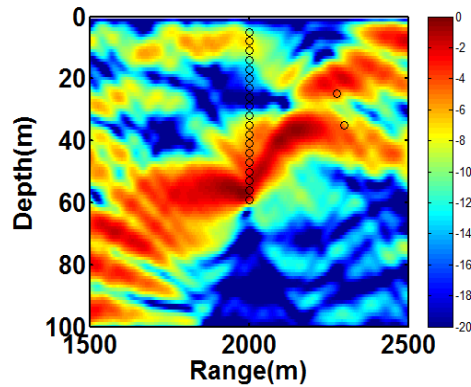
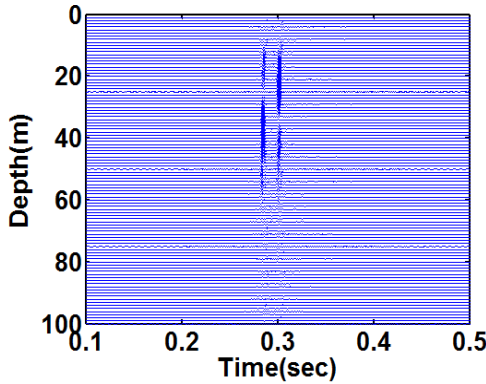


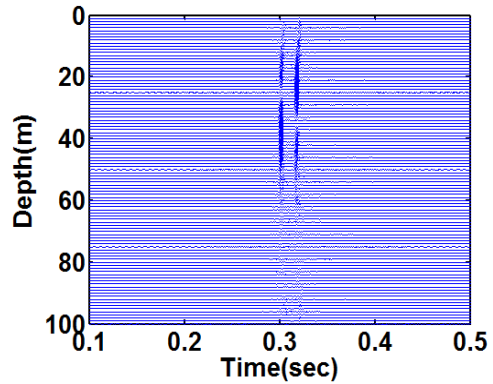
Figure 5.6. Multiple focusing for ATRM at VSA1 and VSA2.

Fig 5.4와 유사하게 VPS1과 VPS2 위치로 음파가 전파는 되나 역시, 주파수 영역에서는 정확한 집속현상을 살펴보기가 어렵기 때문에 Fig 5.7과 같이 시간 영역에서 자세히 살펴보도록 한다. Fig 5.5와 Fig 5.7의 (a)와 (b)을 각각 비교해보면 Fig 5.7 (a)와 (b)에서 보듯이 VPS1 위치에 집속 시 VPS2에 의한 간섭신호를 널링하며, VPS2 위치에 집속 시 VPS1에 의한 간섭신호의 널링을 확인 할 수 있다.

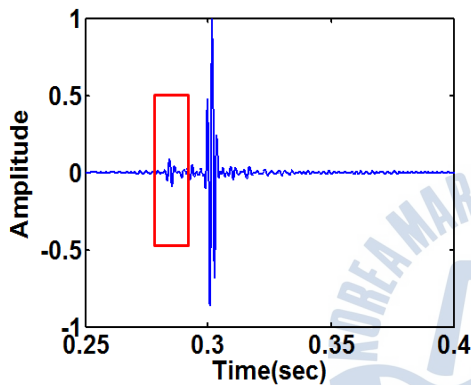




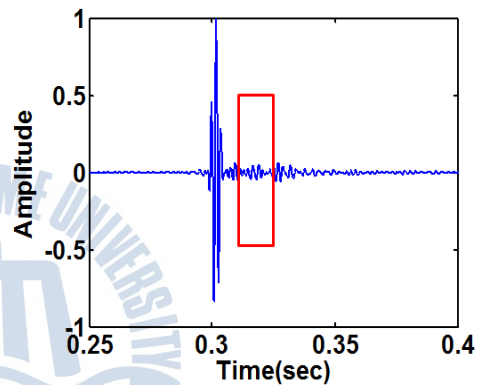
(a). Depth stack for VPS1.



(b). Depth stack for VPS2.



(c). Focused signal at (2275m, 25m).



(d). Focused signal at (2300m, 35m).

Figure 5.7. Multiple focusing for ATRM with long VSA in time domain.

하지만, 만약 두 가상의 음원 VPS1과 VPS2가 너무 가깝게 붙어있는 경우 즉, 두 개의 구속치 행렬(constraint matrix)이 너무 근접할 경우 특이점(singular)이 발생할 수 있다[1]. 예를 들어, 적응 시역전처리에서 두 구속치 행렬이 너무 가까울 경우 Fig 5.8과 같이 집속하고자 하는 위치에서의 집속이 이루어지지 않음을 확인할 수 있다.

이러한 현상은 적응 시역전처리에서 뿐만 아니라 Fig 5.9와 같이 다중 집속을 위해 적응 시역전 개념을 적용한 가상 음원배열 기법에도 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. Fig 5.9는 Fig 5.2와 동일한 해양도파관 환경이지만 VPS1과 VPS2의 위치를 각각 VPS1(2275m, 25m) 및 VPS2(2300m, 25m)로 아주 근접한 조건에서의 시뮬레이션 결과이다.

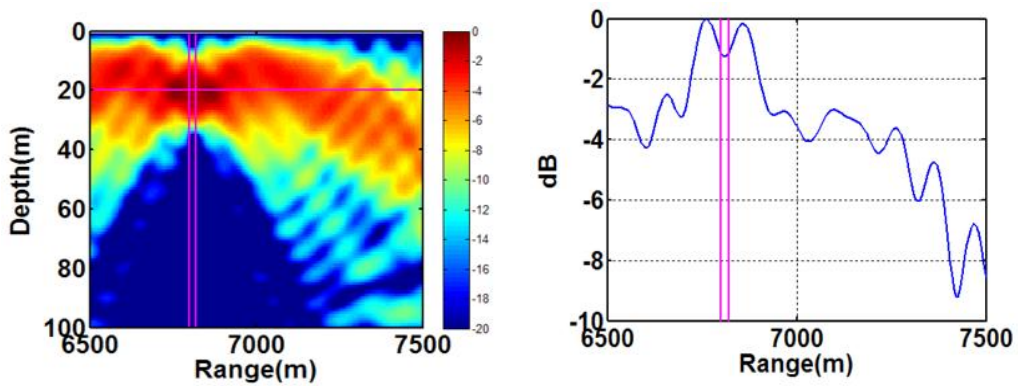
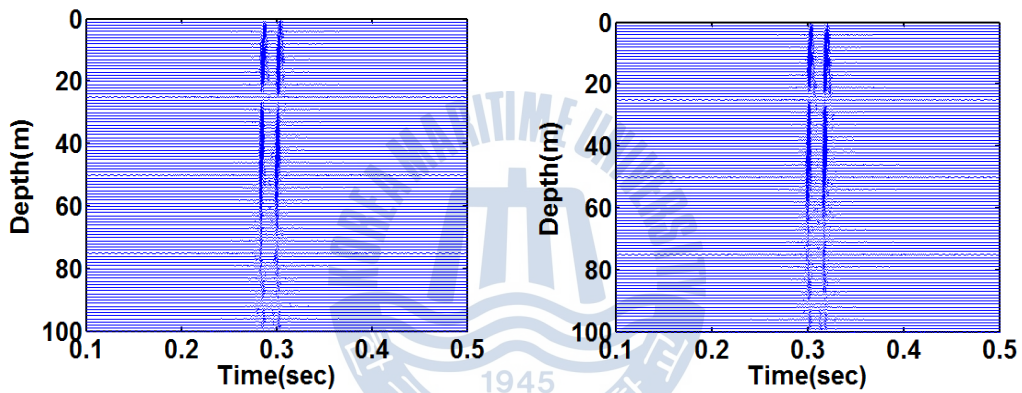
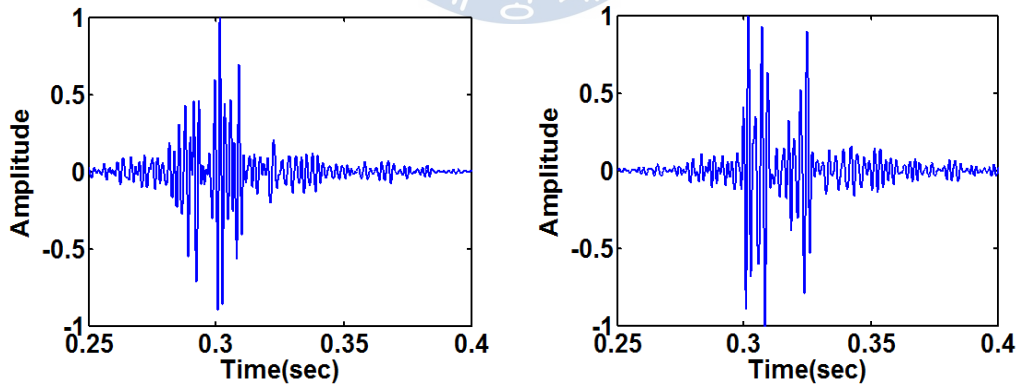


Figure 5.8. ATRM with MCM for too close constraints.



(a). Depth stack for VPS1.

(b). Depth stack for VPS2.



(c). Focused signal at (2275m, 25m).

(d). Focused signal at (2300m, 25m).

Figure 5.9. Multiple focusing for ATRM with long VSA in time domain with close constraints.

Fig 5.9를 통해 시간영역에서의 집속 신호를 확인해 본 결과 (c)와 (d)와 같이 VPS1 및 VPS2의 위치에서 음파의 집속이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 만약 Fig 5.7 및 Fig 5.9 경우의 각각의 구속치 벡터사이의 상관계수(correlation coefficient)를 Fig 5.10과 같이 비교해 보았을 때, Fig 5.7의 경우(파랑) VPS1과 VPS2에 의한 구속치 벡터 사이의 상관계수가 낮은 반면에, Fig 5.9의 경우(빨강) 즉, VPS1과 VPS2가 너무 근접할 때 두 가상음원 사이의 상관계수가 1에 가까움을 알 수 있다. 또한 VSA와 VPS사이를 균일매질(homogenous medium)이 아닌 실제 해양 도파관환경을 고려하였을 경우(검정) 상관계수가 균일매질이라고 가정한 환경보다 낮음을 알 수 있다.

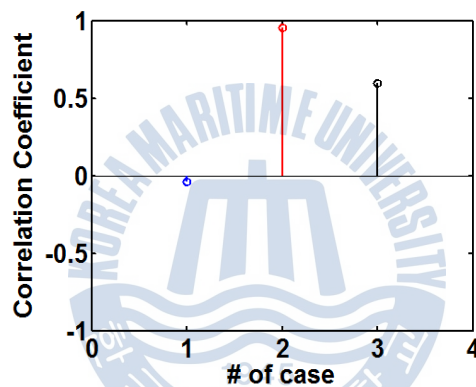


Figure 5.10. Correlation Coefficient between the case of Fig 5.7, Fig 5.9 and waveguide.

가상 음원배열의 개념을 적용하기 위해서는 실제 해양도파관 환경이 아닌 균일 매질 환경을 가정해야하기 때문에 이러한 문제점을 완화할 수 있는 방법이 필요하며 이러한 문제점은 다음절에서 설명한 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)에 의해 완화될 수 있다. 자세한 내용은 다음절에서 설명하였다.

## 5.2 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 이용한 다중 집속 방법

5.1절에서 설명한 적응 시역전을 기반으로 한 가상 음원배열 개념을 이용하

여 음파의 다중 집속을 수행 하였다. 하지만, 두 가상음원 VPS1과 VPS2가 너무 근접할 경우 두 구속치 벡터 사이의 상관계수가 너무 높아 집속성능이 매우 안 좋아 짐을 확인할 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 절에서는 특이값 분해 개념에 대해 설명하고 다중 집속을 위한 가상 음원배열 개념에 적용 방안에 대해 살펴보도록 한다.

신호벡터로 이루어진 행렬  $\mathbf{M}$ 은 식(5.1)과 같이 다음과 같이 분해될 수 있다.

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^+ \quad (5.1)$$

여기서  $\left[ \right]^+$ 는 위상공액(hermitian transpose)를 의미한다.  $\mathbf{U}$ 는  $J \times P$  직교행렬로써 행렬  $\mathbf{M}$ 의 left singular vector라고 하며,  $\mathbf{\Sigma}$ 는 대각행렬이 특이값으로 이루어진  $P \times P$  대각행렬을 나타낸다.  $\mathbf{V}$ 는  $N \times P$  직교행렬로 행렬  $\mathbf{M}$ 의 right singular vector라고 정의한다. 여기서  $J$ 는 TRM의 개수를 나타내며  $N$ 은 구속치 벡터 즉, 가상의 음원(VPS) 개수를 나타낸다. 식(5.1)을 통해 분해된 행렬  $\mathbf{U}$ 의 첫 번째 열벡터는 특이값으로 이루어진 대각행렬  $\mathbf{\Sigma}$ 중 가장 큰 값과 상관성이 있으며 이러한 가장 우세한(dominant) 벡터만을 이용하여도 안정적인(stable) 음파의 집속이 가능하다[17].

특이값 분해를 통해 가장 우세한 벡터를 구했다면, 적응 시역전처리에서의 신호벡터  $\mathbf{w}$ 를 구하는 식(2.11)은 식(5.2)와 같이 수정될 수 있다[1].

$$\mathbf{w} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{U} [\mathbf{U}^{\dagger} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{U}]^{-1} \mathbf{\Sigma}^{-1} \mathbf{V}^+ \mathbf{c}, \quad \mathbf{c} = [1, 0, \dots, 0]^T \quad (5.2)$$

즉, Fig 5.9와 같이 근접한 두 가상음원 사이의 상관관계가 너무 높을 경우, 두 신호벡터로 이루어진 행렬의 특이값 분해를 통해 가장 우세한 벡터만을 추출하여 식(5.2)를 통해 재전파하는 원리이다.

Fig 5.11 및 Fig 5.12는 특이값 분해를 통한 다중 집속 시뮬레이션 결과를 나타내며, 결과 비교를 위해 5.1절 Fig 5.9의 해양 도파관 환경 및 두 가상음원 VPS1(2275m,25m), VPS2(2300m,25m)의 위치 모두 동일한 조건을 적용 하였다.

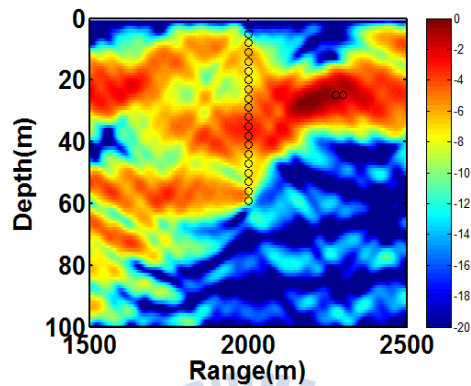
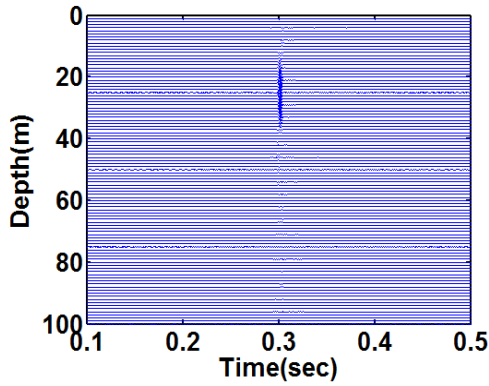
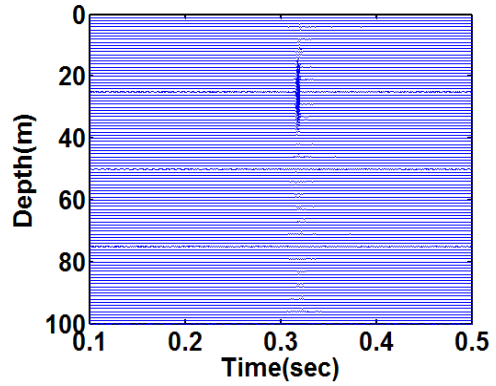


Figure 5.11. Multiple focusing for SVD at VSA1 and VSA2.

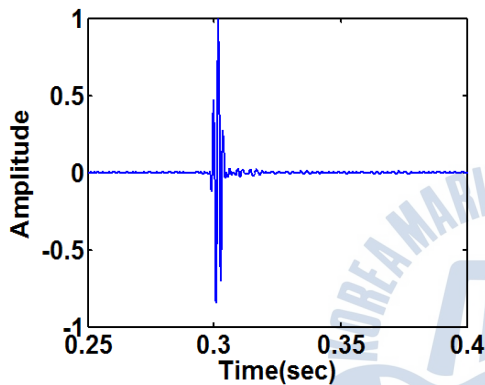




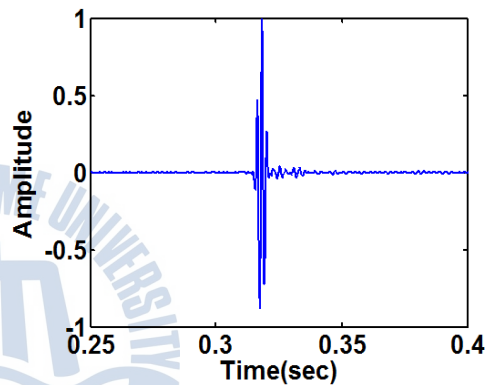
(a). Depth stack for VPS1.



(b). Depth stack for VPS2.



(c). Focused signal at (2275m, 25m).



(d). Focused signal at (2300m, 25m).

Figure 5.12. Multiple focusing for SVD with long VSA in time domain.

Fig 5.9와 같이 적응 시역전처리 기법을 적용하였을 때 두 신호벡터간의 상관관계가 너무 높아 음파의 집속성능이 현저히 저하되는 경우에 비해, 특이값 분해를 통해 가장 우세한 벡터만을 추출하여 재전파하게 되면 Fig 5.12와 같이 음파의 집속성능이 상당히 좋아짐을 확인할 수 있다.

Fig 5.13 및 Fig 5.14는 두 가상음원 VPS1과 VPS2를 각각 2275m, 98m 및 2300m, 98m에 위치한 결과이며, 특이값 분해기법을 적용한 가상 음원배열 개념을 이용해 해저면 근처까지도 음파의 다중 집속이 가능함을 알 수 있다.

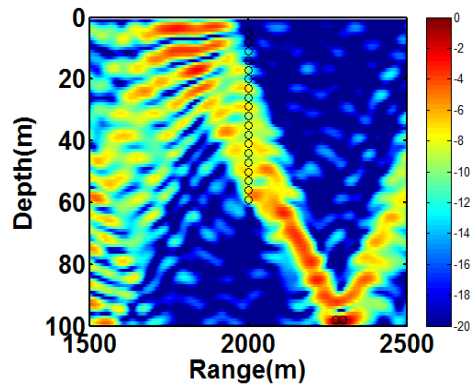
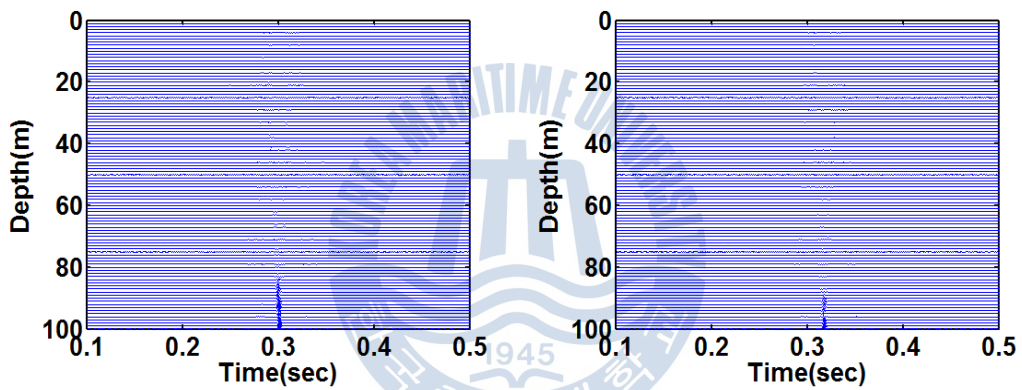
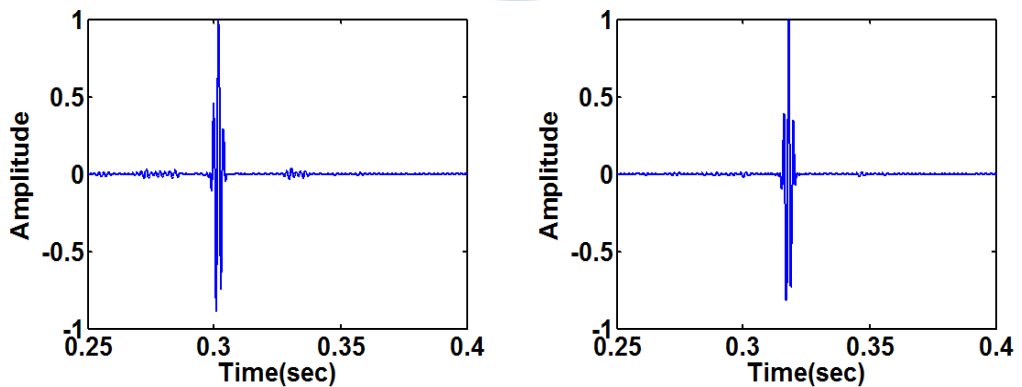


Figure 5.13. Multiple focusing for SVD at VSA1 and VSA2.



(a). Depth stack for VPS1.

(b). Depth stack for VPS2.



(c). Focused signal at (2275m, 98m).

(d). Focused signal at (2300m, 98m).

Figure 5.13. Multiple focusing for SVD with long VSA in time domain.

## 6. 결 론

복잡한 해양환경 속에서 수중통신 및 잔향음 제거, 능동 이미지 처리, 표적 탐지 등 다양한 목적으로 시역전처리 기법이 사용되어진다. 시역전처리를 통해 음원의 위치에 음파의 에너지를 집중시킬 수 있으며 해양환경에 대해 자가 적응 특성인 시역전처리는 해양환경의 복잡성에도 여러 다른 분야에 효율적으로 적용이 가능하다. 하지만 이러한 효율성에도 불구하고 시역전처리의 수행 시, 집중 시키고자 하는 위치에 항상 음원이 존재해야하는 제약조건이 따른다. 최근 이러한 제약조건을 부분적으로 해결한 가상 음원배열 개념 및 수조실험에 대해 검증된 문헌이 발표되었으며, 이러한 가상 음원배열 개념을 이용하여 음원이 존재하지 않는 공간에도 음파를 집중 시킬 수 있다. 이러한 개념을 이용한다면, 경우에 따라 일반적인 시역전처리 보다 효율적인 집중 및 다른 분야로의 적용 가능성이 높음을 알 수 있다.

하지만 실제 해양환경에서는 해양변동성에 의해 일반적인 시역전처리 및 가상 음원배열 개념 또한 부정합이 발생하여 집중 성능의 저하가 발생할 것이다. 본 논문에서는 이러한 부정합에 대한 강인한 방법으로 가상 음원배열 개념에 적응 시역전처리 및 특이값 분해 개념을 적용하여 해양변동성에도 강인한 음파의 집중이 가능한 알고리즘을 제안하였다.

해양변동성에 의해 발생하는 집중 부정합에 대해 강인한 방법으로 가상 음원배열 개념에 여러 가지 다중집속 방법을 적용하였으며, 시뮬레이션을 통해 결과를 분석하였다. 가장 간단한 방법인 중첩에 의한 다중집속 방법을 적용하면, 다른 음원의 영향에 의해 집중되는 신호에 간섭신호가 발생하였으며 이러한 간섭신호는 수중통신 및 다른 분야에서의 성능저하의 원인이 되므로 간섭신호의 제거는 필수적이다.

이러한 간섭신호 제거 및 다중집속을 위해 적응 시역전처리 기법을 적용하였으나 두 가상음원 사이의 상관계수가 높을수록 즉, 두 가상음원이 너무 근접할 경우 음파의 집중성능이 현저히 저하됨을 확인 할 수 있었다.



이러한 문제점을 해결하기 위해 가장 우세한 특이값에 해당하는 수신벡터를 추출하여 재전파하는 특이값 분해 방법을 적용하여, 두 가상음원사이의 상관관계수가 높을 때 발생하는 문제점을 해결하였다. 하지만 이러한 특이값 분해를 통한 다중집속 방법은 두 가상음원사이의 상관관계수가 높을수록 성능이 좋으므로, 목적에 따라 적응 시역전처리 기법 및 특이값 분해 개념을 통한 다중집속 방법을 선택적으로 사용함이 효과 적이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 기존의 시역전처리에 적용되었던 여러 가지 적응 방법을 새로운 가상 음원배열 개념에 적용하여 그 효율성을 검증하였으며 부정합에 대한 강인한 집속방법의 가능성을 제안하였다. 실제 해양에서의 실험 및 또 다른 분야로의 적용을 위해 이에 대한 이론적인 연구와 실험적인 연구가 앞으로 수행되어져야 할 것이다.



## 참고문헌

- [1] H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, K. G. Sabra, and T. Akal, "Passive reverberation nulling for target enhancement," J. Acoust. Soc. Am. **122** (6), 3296-3303 (2007).
- [2] H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, M. Stevenson, and T. Akal, "Improvement of Time-Reversal Communications Using Adaptive Channel Equalizers," IEEE J. of Ocean Eng. **31** (2), 487-496 (2006).
- [3] 주재훈, 시역전처리에서 센서배열 최적화 및 수중통신 적용, 박사 학위논문 (2013).
- [4] A. Thode, W. Kuperman, G. D' Spain, and W. Hodgkiss, "Localization using Bartlett matched-field processor sidelobes," J. Acoust. Soc. Am. **107**, 278-286 (2000).
- [5] W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal, C. Ferla, and D. R. Jackson, "Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror," J. Acoust. Soc. Am. **103**, 25-40 (1998).
- [6] W. S. Hodgkiss, H. C. Song, and W. A. Kuperman, T. Akal, C. Ferla, and D. R. Jackson, "A long-range and variable focus phase-conjugation experiment in shallow water," J. Acoust. Soc. Am. **105** (3), 1597-1604 (1998).
- [7] S. C. Walker, P. Roux, and W. A. Kuperman, "Synchronized time-reversal focusing with application to remote imaging from a distant virtual source array," J. Acoust. Soc. Am. **125**, 3828-3834 (2009).
- [8] M. Fink, "Time-reversal mirrors," J. Phys. D **26**, 1330-1350 (1993).
- [9] M. Fink, "Time-reversed acoustics," Phys. Today **50**, 34-40 (1997).

- [10] Seongil Kim, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, G. F. Edelmann, and T. Akal, "Robust time reversal focusing in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 145-157 (2003).
- [11] H. C. Song, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, T. Akal, and C. Ferla., "A time-reversal mirror with variable range focusing," *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 3234-3240 (1998).
- [12] J. S. Kim, H. C. Song, and W. A. Kuperman, "Adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **109**, 1817-1825 (2001).
- [13] J. S. Kim and K. C. Shin, "Multiple focusing with adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **115**, 600-606 (2004).
- [14] C. L. Pekeris, "Theory of propagation of explosive sound in shallow water," *Geol. Soc. Amer. Mem.* 27(1948).
- [15] A. O. Williams, "Normal-mode methods in propagation of underwater sound," in *Underwater Acoustics*, ed. R. W. B. Stephens, (Wiley-Interscience, New York, 1970).
- [16] M. B. Porter, "A numerical method for computing ocean acoustic modes," Ph.D. dissertation, Northwestern Univ. (1984).
- [17] M. B. Porter and E. L. Reiss, "A numerical method for ocean acoustic normal modes," *J. Acoust. Soc. Am.* **76**, 244-252 (1984).
- [18] F. B. Jensen and W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, American Institute of Physics, New York (1994).
- [19] D. R. Jackson and D. R. Dowling, "Phase conjugation in underwater acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* **89**, 171-181 (1990).

- [20] 신기철, 해양 정합장치처리와 시계열반전처리의 적응성, 박사 학위논문 (2003).
- [21] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, Array Signal Processing : Concepts and Techniques, Prentice-Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim, Series Editor (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993).
- [22] H. Cox, “Robust adaptive beamforming,” IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process. **ASSP-35**, 1365-1376 (1987).



